

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.262>



扬子陆块北缘东河铂钯矿化超基性岩脉成岩时代与岩石成因:锆石年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素约束

曹亮^{1,2}, 陈林³, 段其发^{1,2}, 周云^{1,2}, 刘重芃^{1,2}, 张利国^{1,2}

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北武汉 430205

2. 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心, 湖北武汉 430205

3. 湖北省地质局第二地质大队, 湖北恩施 445000

摘要: 东河铂钯矿化超基性岩脉位于扬子陆块北缘房县东河地区, 铂钯矿体产于超基性岩辉石岩脉中。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年表明该超基性岩脉结晶侵位年龄为 433.2 ± 2.9 Ma, 属于早志留世。地球化学特征上, 岩石具有较低含量的 SiO_2 (39.73%~47.46%, 均值为 41.41%)、中等偏低的 $\text{Mg}^{\#}$ (46.98~67.37) 和高铝(11.25%~15.46%) 的特征, 整体上属于高铝质超基性岩类。微量元素和稀土元素方面, 岩石具有较高的稀土总量、轻稀土富集和无明显的 Eu 正异常特征 ($\Sigma\text{REE}=59.59 \times 10^{-6}$ ~ 375.02×10^{-6} , $(\text{La}_{\text{N}}/\text{Yb}_{\text{N}})=3.94 \sim 19.13$, $\delta\text{Eu}=0.93 \sim 1.13$), 所有岩石富集 Rb、Ba、Sr、Nb、Ti 等元素, 亏损 K、Hf、P 等元素, 且具有显著不同于地壳的不相容元素组成。Sr、Nd、Hf 同位素研究表明, 东河超基性岩具有低的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (0.703 26 ~ 0.704 15), 正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (4.37~5.27) 和正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (7.29~10.26)。综合研究表明: 东河超基性岩来自亏损的岩石圈地幔源区, 可能有富集岩石圈地幔组分的加入, 原始岩浆在上升侵位过程中地壳物质的混染不明显。微量元素构造环境判别显示其形成于板内构造环境, 通过分析表明东河地区在早志留世应处于被动大陆边缘, 拉张伸展的状态, 研究区出露的两期超基性岩床(脉)为岩石圈处于拉张状态下大陆裂谷早期阶段的产物。

关键词: 超基性岩; 锆石年代学; 辉石岩; Sr-Nd-Hf 同位素; 东河地区; 扬子陆块; 地球化学。

中图分类号: P581; P597

文章编号: 1000-2383(2019)02-0366-21

收稿日期: 2018-11-29

Geochronology and Petrogenesis of the Donghe Pt-Pd-Bearing Ultramafic Dykes in the Northern Margin of the Yangtze Block: Constraints from Zircon Geochronology, Geochemistry and Sr-Nd-Hf Isotopes

Cao Liang^{1,2}, Chen Lin³, Duan Qifa^{1,2}, Zhou Yun^{1,2}, Liu Chongpeng^{1,2}, Zhang Liguo^{1,2}

1. Wuhan Center of Geology Survey, CGS, Wuhan 430205, China

2. Research Center of Granitic Diagenesis and Mineralization, China Geological Survey, Wuhan 430205, China

3. Second Geological Team of Hubei Geological Bureau, Enshi 445000, China

Abstract: The Donghe Pt-Pd-bearing ultramafic dykes are located in the northern margin of the Yangtze block in Fangxian, the Pt-Pd ore bodys are present in the ultramafic dykes of pyroxene veins. The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating indicates that the ultrabasic dykes were emplaced with age of 433.2 ± 2.9 Ma, belonging to the early Silurian. The rocks are characterized by low SiO_2 (39.73%~47.46%, mean 41.41%), moderate $\text{Mg}^{\#}$ (46.98~67.37) and high alumina (11.25%~15.46%), belonging to high-alumina ultrabasic rocks. The rocks have higher total REE, with slightly enriched LREE and without significant Eu positive anomaly ($\Sigma\text{REE}=59.59 \times 10^{-6}$ to 375.02×10^{-6} , $(\text{La}_{\text{N}}/\text{Yb}_{\text{N}})=3.94 \sim 19.13$, $\delta\text{Eu}=0.93 \sim 1.13$). All rocks are enriched in

基金项目: 中国地质调查局扬子工程湘西—鄂西成矿带神农架—花垣地区地质矿产调查二级项目(No.DD20160029)。

作者简介: 曹亮(1982—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 从事矿床地质研究。ORCID: 0000-0002-2759-1694. E-mail: okeyokok@163.com

引用格式: 曹亮, 陈林, 段其发, 等, 2019. 扬子陆块北缘东河铂钯矿化超基性岩脉成岩时代与岩石成因: 锆石年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素约束. 地球科学, 44(2): 366~386.

Rb, Ba, Sr, Nb, Ti, etc., depleted in Nb, Hf, P, etc. and have significantly different ratios of incompatible elements to that in the crust. Sr, Nd and Hf isotope studies show that the Donghe ultramafic rocks have low initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios (0.703 26–0.704 15), positive $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (4.37~5.27) and positive $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (7.29–10.26). Based on the above discussion, we propose that the studied ultramafic rocks were derived from a depleted lithospheric mantle (garnet-lherzolite) source which may be enriched lithospheric mantle components. Magma in the rising process was not significantly affected by the crust material mixed. The tectonic discrimination of trace elements shows that it formed in intraplate tectonic environment. The analysis shows the Donghe region should be on the passive continental margin during the Early Silurian and should be in extensional state. The two-stage ultramafic bedrocks (veins) exposed in the study area were the products of the early stage of the continental rift in the state of extensional of the lithosphere.

Key words: ultramafic rocks; zircon geochronology; pyroxenite; Sr-Nd-Hf isotopes; Donghe area; Yangtze block; geochemistry.

0 引言

扬子陆块北缘及秦岭造山带一直是构造地质学以及沉积学工作者研究的热点。扬子陆块北缘在早古生代具有被动大陆边缘的特征,它起因于秦岭洋的扩张而导致的扬子克拉通边缘拉张—离散演化而成。该被动大陆边缘经历了晚元古代—震旦纪的拉张裂陷、寒武纪—中奥陶世的强烈离散、晚奥陶世—志留纪的收缩充填3个发展阶段(吉让寿等,1990)。南秦岭构造带以出露近乎连续的寒武纪—三叠纪地层、并在陕西紫阳—岚皋—平利和湖北竹溪等地的早古生代地层中发育一套超镁铁质—镁铁质岩脉和碱性火山杂岩而独具特色(张成立等,2007)。按不同构造学观点,秦岭造山带构造划分存在很大差异。自板块构造理论应用以来,以“商(南)丹(凤)板块缝合线”为界将秦岭造山带分为北秦岭和南秦岭两个构造带,其北纬华北板块南缘活动边缘,其南为扬子板块北缘被动边缘(李春昱等,1978,1982;许志琴等,1988;张国伟等,1988,1991)。随后张国伟等(1995,1996)提出了秦岭造山带为“三块夹两缝”构造,划分为华北板块、秦岭微板块和扬子板块,相互之间分别被商丹和勉略缝合带所分割。冯益民等(2002)认为秦岭经历了新元古代—早古生代的古大陆裂解、洋盆形成、俯冲碰撞造山、晚古生代—三叠纪的板内伸展和晚三叠世—新生代的陆内叠覆造山三个重要的演化阶段,商丹带以北划为大洋盆地相和弧后盆地相;南秦岭勉略带定位板内裂谷相,其两侧的震旦系—志留系定为陆源深裂陷盆地相。根据大地构造相单元划分原则(Robertson, 1994; 许靖华等,1998),王宗起等(2009)将秦岭造山带分为13个主要构造单元,其中研究区所在位置,为南秦岭弧后陆坡带,只保留大巴山弧后陆缘。扬子陆块和大巴山造山带以规模巨大的城口—房县弧形断裂为界(张岳桥等,2010),北为归属于南秦岭的北大巴山逆

冲构造带,南为大巴山前陆构造带,呈弧形展布(王瑞瑞等,2011;王瑞瑞等,2013)。研究区位于城口—房县断裂北部,扬子陆块北缘大巴山前陆构造带。前人对断裂以北大巴山北部镁铁质岩脉和火山岩及其幔源捕捞体的岩石学、矿物学及地球化学开展了一定研究,提出它们是早古生代晚期南秦岭被动陆缘裂陷拉张幔源岩浆活动的产物(黄月华等,1992,1993;夏祖春等,1992;夏林圻等,1994;何建坤,1999;张成立等,2002;王存智等,2009;邹先武等,2011)。对南秦岭志留纪构造演化,迄今仍存在:被动陆缘大陆裂谷(徐学义等,2001;张成立等,2002)和弧后拉张(王坤明,2014;王宗起等,2009;王刚,2014;Zhu et al., 2014)两种不同观点。

相比南秦岭北大巴山构造带,扬子陆块北缘南大巴山地区基性—超基性研究相对薄弱。曹亮等(2015)对断裂以北大巴山南部扬子陆块区东河地区的基性岩床辉绿玢岩进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb定年,定年结果为439.3 Ma,属于早志留世(曹亮等,2015)。本文系统采集了扬子陆块北缘东河地区基性—超基性辉石岩脉样品,通过年代学研究,确定了其侵位年龄。本文通过岩石地球化学和Sr-Nd-Hf同位素研究,揭示其地壳混染程度、岩浆源区特征及构造背景,为扬子陆块北缘早古生代构造格局和地幔性质增添新的证据。

1 区域地质概况与超基性岩脉特征

1.1 区域地质概况

扬子陆块在北部以秦岭一大别—苏鲁造山带和华北板块相隔,区内侵入岩主要为基性—超基性岩类,岩石类型有辉长岩、辉长辉绿岩、闪长岩和辉石岩等,侵入地层为寒武系—奥陶系。扬子陆块北缘大巴山地区早生代发育较为强烈的岩浆活动。早古生代岩

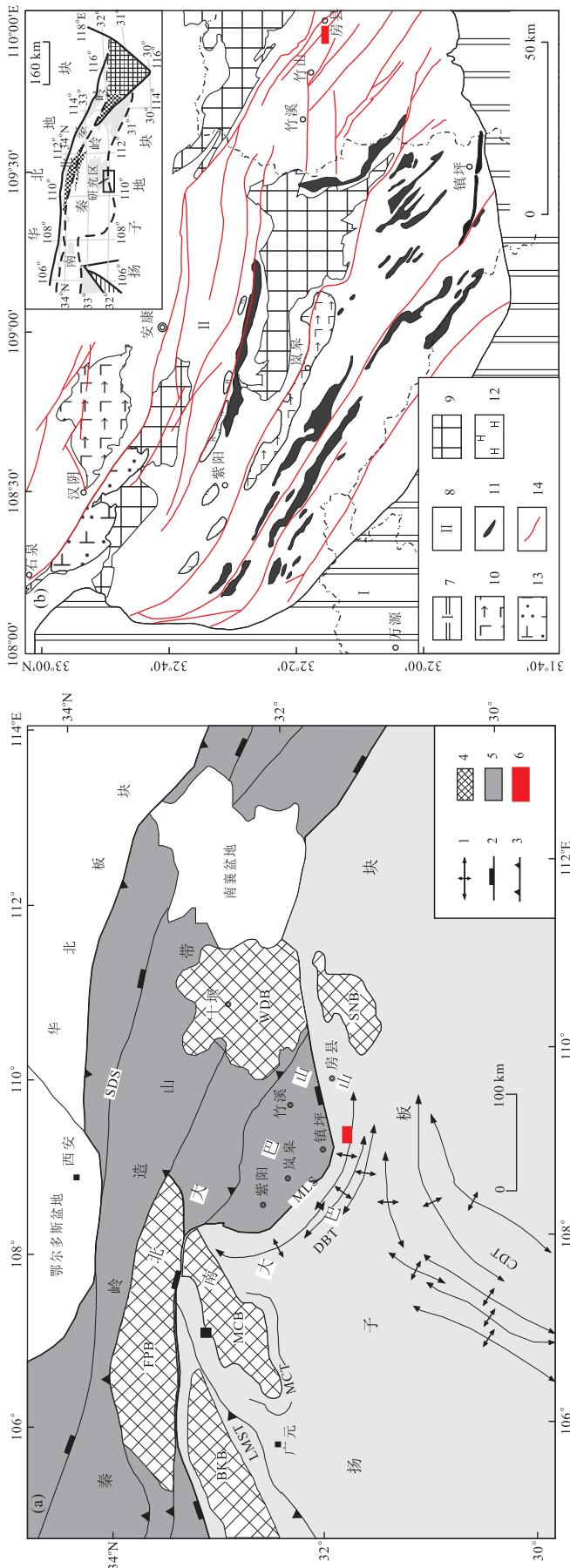


图1 扬子地块与南秦岭造山带构造单元划分(a)及北大山地区基性火山岩分布(b)

Fig.1 Sketch map of tectonic units of the South Qinling orogen and Yangtze block

a.据董有浦等(2011);b.据邹先武等(2011);BKB.碧口地体；MCB.米仓山隆起；FPB.佛坪地体；WDB.武当地体；SNB.神农架地体；LMST.龙门山冲断褶皱带；MCT.米仓山冲断褶皱带；DBT.大巴山冲断褶皱带；CDT.川东冲断褶皱带；SDS.商丹缝合带；MLS.勉略缝合带；SDS.商丹缝合带；1.褶皱带；2.缝合线；3.冲断层；4.刚性地体；5.造山带；6.研究区；7.扬子陆块；8.扬子陆块北部陆缘区；9.前寒武隆起区；10.吉橄榄—碱性玄武岩；11.基性岩脉；12.粗面岩；13.石英闪长岩；14.断层



图2 房县东河铂钯矿野外露头

Fig.2 Fangxian Donghe platinum palladium field outcrop
下部深色部分为辉石岩

浆活动在扬子陆块北缘陕西紫阳、岚皋、地区产生了大小脉岩近百条(图1b),岩脉多呈顺层或小角度切割地层侵入,它们与东部平利和湖北竹溪地区发育的脉岩及少量潜成基性火山岩构成该地区特有的早古生代岩墙群(张成立等,2002).南秦岭竹山—岚皋地区早中志留世发育强烈的碱性岩浆活动,侵位峰期在450~430 Ma,该地区早古生代碱性岩浆活动与镁

铁质岩浆事件时限基本一致(朱江等,2017).研究区位于扬子陆块与秦岭造山带之间(图1a),城口断裂北侧(图3),竹山碱性杂岩体的东部(图1b),主要有辉绿玢岩和辉石岩两期侵入基性—超基性岩脉.

1.2 超基性岩脉特征

矿区出露寒武系—志留系灰绿色千枚岩夹炭质板岩、灰岩及硅质岩,辉石岩呈岩脉状产出(图2).铂钯矿化与钛磁铁矿化产于辉石岩中,前者一般产于辉石岩的中下部,矿化体产状与辉石岩一致.目前共发现24个矿化体.铂+钯含量为0.120~0.158 g/t,伴生有益组分TFe(全铁含量)为14.20%~15.04%,TiO₂含量为25.61%,含少量V、Cu、Co,可综合利用.

铂钯矿化体赋存于辉石岩脉中,呈似层状和透镜状,矿物成分主要为磁铁矿、钛铁矿,其次为黄铁矿和黄铜矿等,铂钯矿以分散状态含于普通辉石、磁铁矿和黄铁矿中,呈变余半自形粒状结构,块状结构.

研究区位于扬子陆块与南大巴山造山带交接的部分,城口断裂北侧(图3).区内基性岩近东西向顺层侵入寒武系—志留系地层.通过野外观察,辉石岩侵入最高层位为下志留统,多处见侵入辉绿玢岩,因此辉石岩应晚于辉绿玢岩.按侵入期的先后关系可分为辉绿玢岩和辉石岩两个侵入期.第一期辉绿玢

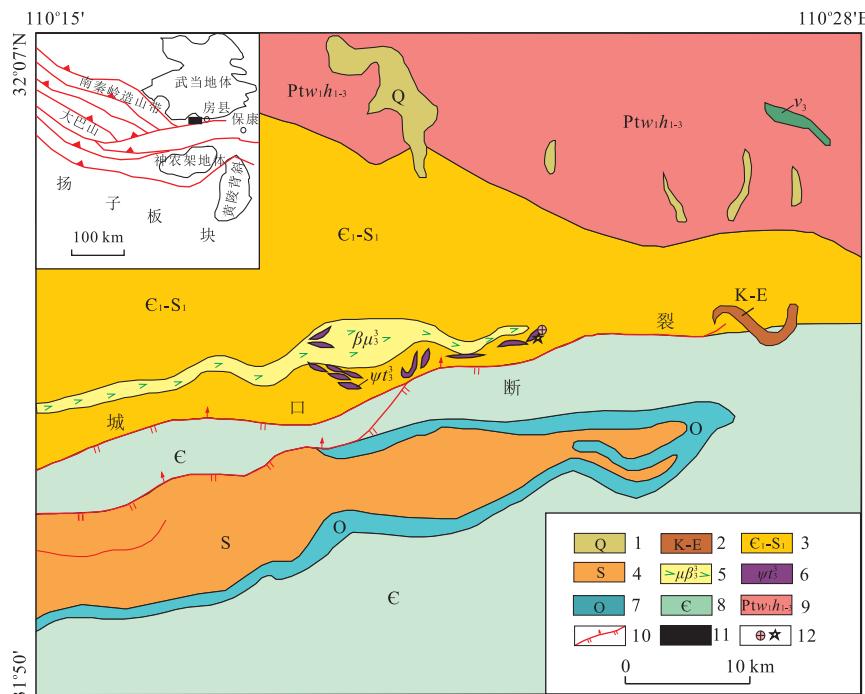


图3 扬子陆块北缘房县东河地区地质简图

Fig.3 Figure of geology Fangxian Donghe in northern margin of Yangtze platform

1.第四系;2.下第三系—白垩系;3.下寒武统—下志留统;4.志留系;5.辉绿玢岩;6.辉石岩;7.奥陶系;8.寒武系;9.武当群;10.逆断层;11.研究区;12.铂钯矿及取样位置

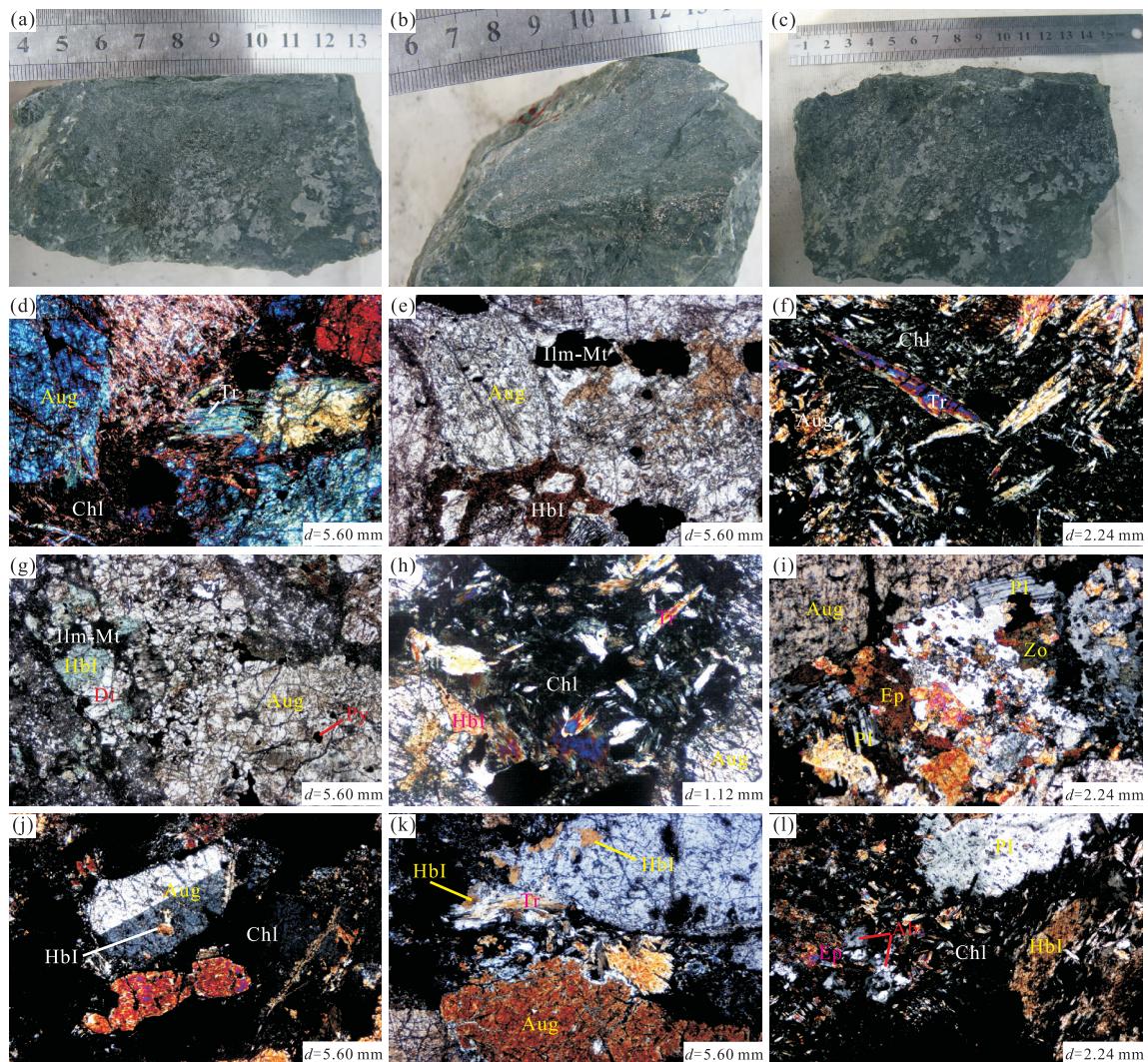


图 4 东河超基性岩岩石标本及岩石镜下特征照片

Fig.4 Rocks sample photographs and microphotographs of rocks of the ultramafic rocks in Donghe area

a.灰绿色块状构造变辉石岩;b.灰绿色含黄铁矿矿化块状构造角闪辉石岩;c.灰绿色块状角闪辉石岩;d.辉石式解理及简单双晶;e.不规则粒状角闪石,少量钛铁矿、磁铁矿;f.针状透闪石交代角闪石及辉石;g.透辉石、角闪石、绿帘石及绿泥石等沿边缘及裂隙交代普通辉石;h.棕褐色不规则粒状角闪石沿辉石、透辉石边缘及裂隙交代;i.发育聚片双晶结构的斜长石;j.辉石式解理及简单双晶;k.棕褐色不规则粒状角闪石沿辉石、透辉石边缘及裂隙交代,呈残余结构;l.不规则粒状斜长石被绿帘石、黝帘石及绿泥石等交代强烈呈假象结构;Aug.普通辉石;Hbl.普通角闪石;Pl.斜长石;Ab.钠长石;Di.透辉石;Mt.磁铁矿;Ilm.钛铁矿;Chl.绿泥石;Zo.黝帘石;Ep.绿帘石

岩构造位置处于大巴山弧形构造与淮阳山字型西翼反射弧的交接地带,竹房大型入字型构造锐角部位,较明显的受构造控制。岩体成岩床产出,与震旦系、下寒武统一下志留统接触。第二期辉石岩为呈透镜状和雁形排列的小岩体,侵入震旦系,下寒武统一下志留统地层和第一期辉绿玢岩(图 3)。本次研究重点为与铂钯矿床关系密切的辉石岩。

镜下观察该期超基性岩脉岩石组合主要由矿化蚀变辉石岩和角闪辉石岩组成。岩石类型的镜下特征如下:

DH-B3 样品镜下定名为矿化蚀变辉石岩。岩石

呈灰绿色(图 4a),中粗粒自形一半自形短柱状结构,块状构造。主要矿物为普通辉石(75%)、透闪石(5%)和角闪石(4%),其次为绿帘石(4%)和绿泥石(5%),另含少量斜长石(2%)和绢云母。副矿物主要为少量的磷灰石以及不透明矿物。不透明矿物反光显微镜下可见少量钛铁矿(Ilm)、磁铁矿(Mt)及少量黄铁矿(Py),粒径为 0.002~2.000 mm(图 4e)。普通辉石可见短柱状截面、辉石式解理及简单双晶,角闪石、绿帘石及绿泥石等沿边缘及裂隙交代呈细脉状(图 4d),或辉石颗粒被交代熔蚀呈圆弧状,呈反应边结构,粒径为 0.5~10.0 mm,个别达 11.0 mm

左右。角闪石呈不规则粒状,棕褐色,可能为棕闪石,多色性明显(图4e),沿辉石边缘及裂隙交代,局部被透闪石及绿泥石等交代,部分交代强烈呈残余结构,粒径为0.1~1.0 mm。透闪石呈针状,交代角闪石及辉石等(图4f),被绿泥石等交代强烈,粒径为0.01~1.60 mm。

DH-B5样品镜下定名为矿化蚀变含长辉石岩。岩石呈灰绿色,发育浸染状黄铁矿(图4b),中粗粒自形一半自形短柱状结构,块状构造。主要矿物为普通辉石(70%)、角闪石(4%)、绿帘石(5%)和斜长石(6%),其次为少量钠长石(3%)、透辉石(1%)、透闪石(1%)、绿泥石(3%)、方解石以及磷灰石、不透明矿物等副矿物。不透明矿物反光显微镜下可见少量钛铁矿(IIm)、磁铁矿(Mt)及少量黄铁矿(Py),粒径为0.002~1.400 mm(图4g)。普通辉石可见短柱状截面、辉石式解理及简单双晶,透辉石、角闪石、绿帘石及绿泥石等沿边缘及裂隙交代(图4g),粒径为0.5~10.0 mm。角闪石不规则粒状,棕褐色,可能为普通角闪石及棕闪石,多色性明显,沿辉石、透辉石边缘及裂隙交代,局部被透闪石及绿泥石等交代(图4h),部分交代强烈呈残余结构,粒径为0.1~0.6 mm。斜长石呈半自形—它形板状,可见发育聚片双晶(图4i),分布于辉石等粒间,被绿帘石、黝帘石、绿泥石及绢云母(Ser)等交代强烈呈残余结构,粒径为0.2~1.2 mm。

DH-B8样品镜下定名为矿化蚀变角闪辉石岩。岩石呈灰绿色(图4c),中粗粒自形一半自形短柱状结构,块状构造。主要矿物为普通辉石(65%)、角闪石(6%)和绿泥石(8%),其次为透闪石(4%),少量斜长石(3%)、钠长石、绿帘石(3%)、黝帘石(2%)和方解石。副矿物主要为磷灰石和不透明矿物。不透明矿物反光显微镜下可见少量钛铁矿(IIm)、磁铁矿(Mt)、钛铁晶石及少量黄铁矿(Py),粒径为0.002~1.400 mm。普通辉石可见短柱状截面、辉石式解理及简单双晶(图4j),角闪石、绿帘石及绿泥石等沿边缘及裂隙交代,可见细脉状及交代反应边结构等,粒径为0.5~10.0 mm,个别达12.0 mm。角闪石呈不规则粒状,棕褐色,沿辉石边缘及裂隙交代,局部被透闪石及绿泥石等交代(图4k),部分交代强烈呈残余结构,粒径为0.1~0.6 mm。绿帘石呈不规则粒状,交代辉石及斜长石等(图4l),粒径为0.01~0.50 mm。斜长石呈不规则粒状,未见双晶,分布于辉石等粒间,被绿帘石、黝帘石及绿泥石等交代强烈呈假象结构(图4l),粒径为0.2~1.2 mm。

2 分析方法

2.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学

本次选用的样品破碎与锆石挑选工作由河北省廊坊区域地质调查研究所实验室完成,利用标准重矿物分离技术完成锆石分选,在双目镜下仔细挑选表面平整光洁、不同长宽比例、不同柱锥面的锆石颗粒,之后将锆石粘在双面胶上,用无色透明的环氧树脂固定,固化之后将表面抛光至锆石中心。原位分析前,利用反射光和CL图像仔细研究锆石的晶体形态与内部结构特征。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)采用 Agilent 7500a 的 ICP-MS 仪器与 MicroLas 公司的 Geolas2005 准分子激光剥蚀系统联机进行。实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气,进行精度检测,标准玻璃 NIST610 为外标进行微量元素含量校正,激光束斑直径为 32 μm,激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm。采用标准锆石 Harvard 91500 为外标进行同位素的分馏校正,GJ-1 为内标进行精度检测,标准玻璃 NIST610 为外标进行微量元素含量校正。详细的仪器参数、操作流程和数据处理方法描述见 Liu et al.(2008, 2010a)。采用 Andersen(2002)方法对普通铅进行校正。在数据处理过程中,样标的调试选择误差范围为:91500(1064 ± 10 Ma, 谐和度 99%)、GJ-1(604 ± 2 Ma, 谐和度 99%)。锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图和年龄加权平均值计算采用 ISO-PLOT 软件(ver3.0, Ludwig, 2003)完成,得出的同位素比值和年龄误差均在 1σ 水平。

2.2 岩石地球化学测试

本次实验全岩主量、微量元素和 Sr-Nd 同位素的分析测试在自然资源部中南矿产资源监督检测中心完成。主量元素采用帕拉科生产的 AXIOS 型 X 荧光光谱仪测定,检出限一般大于 0.005%,分析精密度 RSD%:0.1~1.0。微量元素和稀土元素采用美国热电公司生产的 X II Series 型等离子体质谱仪测试,采用混合酸溶矿制样,检出限一般大于 0.01 μg/g。采用分析方法标准为 GB/T14506-2010。分析过程中采用与采样岩性相近的国家一级标样控制分析质量,经数据检查显示标样及密码双样的分析结果均符合 DZ/T0130-2006 相关质量管理规范的要求。全岩 Sr-Nd 同位素分析采用热电离质谱仪 Triton 分析,质谱分析中产生的质量分馏采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 进行幂定律校正,Sm、Nd 含

量采用同位素稀释法公式计算得到。整个分析过程用 GBW04419、BCR-2 和 JMC 标准物质分别对全流程和仪器进行监控。获得的 GBW04419 标准测定平均值分别为: Sm(10^{-6}) = 3.037, Nd(10^{-6}) = 10.14, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ = 0.512 735 ± 0.000 008, BCR-2 的测定平均值分别为: Sm(10^{-6}) = 6.565, Nd(10^{-6}) = 28.81, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ = 0.512 622 ± 0.000 005, JMC 的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ = 0.511 554 ± 0.000 009, 与其推荐值在误差范围内完全一致。全流程 Nd、Sm 空白分别为 2×10^{-10} 和 3×10^{-10} 。

2.3 锆石 Hf 同位素测试

原位微区锆石 Hf 同位素比值测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用激光剥蚀多接受杯等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)完成。仪器操作详细条件和分析方法参照 Hu *et al.*(2012)。数据的离线处理采用软件 ICP-MS Date Cal 完成(Liu *et al.*, 2010b)。 ^{176}Lu 衰变常数 $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (吴福元等, 2007)。球粒陨石(CHUR)的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ = 0.033 200, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ = 0.282 772(Blichert-Toft and Albarède, 1997); 亏损地幔(DM)的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ = 0.038 400, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ = 0.283 250, $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值为 0.16(Griffin *et al.*, 2000); 大陆平均地壳(CC)的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ = 0.015, $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值为 -0.55(Griffin *et al.*, 2002)。

3 分析结果

3.1 锆石 LA-ICP-MS 年代学

本文对东河超基性岩脉辉石岩样品 16DH-B1 进行了锆石 U-Pb 年代学分析(采样地理坐标 $110^{\circ}24'36''\text{E}, 31^{\circ}59'28''\text{N}$), 共完成 20 颗锆石 19 个有效分析点(表 1)。从锆石的阴极发光 CL 图像可以看出, 锆石具明显的岩浆韵律环带, 且环带较宽(图 5)。

所有分析的锆石均具有较高的 Th/U 含量(Th: 63.8×10^{-6} ~ 303.0×10^{-6} ; U: 51.1×10^{-6} ~ 212.0×10^{-6}), 锆石中 Th/U 比值变化范围在 0.90 ~ 2.20。CL 图像(图 5)和锆石化学特征表明所选锆石为典型的岩浆锆石(Corfu *et al.*, 2003; Hoskin and Schaltegger, 2003; Wu and Zheng, 2004)。

19 个有效分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄介于 421.0 ± 7.9 ~ 447.0 ± 5.6 Ma, 所有分析点均位于谐和曲线上或附近(图 6a), 表明这些锆石几乎没有 U 或 Pb 的丢失和加入, 得出其谐和年龄为 434.4 ± 2.5 Ma

(MSWD = 1.32)(图 6a), 并且与其加权平均年龄 433.2 ± 2.9 Ma(MSWD = 1.21)在误差范围内一致(图 6b), 表明房县东河超基性岩脉辉石岩体的侵位年龄约为 433 Ma, 属于早志留世岩浆活动的产物。

3.2 主量和微量元素

东河地区超基性岩脉辉石岩全岩样品的主要元素和微量元素含量结果见表 2。10 件样品虽然野外观测均较新鲜, 但仍有不同程度的蚀变, 测试分析结果显示所有样品烧失量 LOI 均大于 1.30%, 最大为 2.70%。 SiO_2 含量变化于 39.73% ~ 47.46%, 平均为 41.41%; TiO_2 含量较高, 为 2.20% ~ 6.33%, 平均为 4.15%; Al_2O_3 含量较高, 为 11.25% ~ 15.46%, 平均为 10.24%; MgO 含量较高, 为 5.92% ~ 16.24%, 平均为 10.08%; Mg^+ 为 46.98 ~ 67.37, 平均为 54.46; Na_2O 含量低, 为 0.39% ~ 2.00%, 平均为 1.09%; K_2O 含量低, 为 0.09% ~ 1.30%, 平均为 0.45%。碱含量($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)为 0.48% ~ 2.48%, 富钠低钾($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.90 \sim 10$), 整体上应属于高铝质富钠低钾的超基性岩类。在 TAS 图解中(图 7), 东河地区岩脉大部分落入橄榄辉长岩范围, 一个样品落入亚碱性辉长岩内, 5 个样品属于碱性系列, 5 个样品属于亚碱性系列。

东河超基性辉石岩稀土总量变化范围为 59.59×10^{-6} ~ 375.02×10^{-6} , LREE 含量为 48.70×10^{-6} ~ 341.50×10^{-6} , 平均为 146.98×10^{-6} , HREE 在 10.89×10^{-6} ~ 33.52×10^{-6} , 平均为 20.45×10^{-6} 。LREE/HREE 分布于 4.47 ~ 10.19, $\text{La}_{\text{N}}/\text{Yb}_{\text{N}}$ 介于 3.94 ~ 19.13, 平均为 8.87, 反映轻重稀土元素发生明显分馏, 表现出轻稀土富集重稀土亏损的特征。 δEu 为 0.93 ~ 1.13, 平均为 1.03, 发育弱的负 Eu 异常, 暗示岩石可能在形成过程中斜长石分离结晶作用较弱或源区斜长石残留较少(赵菲菲等, 2017)。在稀土元素配分模式图上(图 8a), 所有样品的整体形态具有很高的相似性, 均表现为向右倾斜的曲线, 与大陆板内拉板玄武岩类似。

微量元素含量(表 2)表明, 辉石岩具有高 Sr(806×10^{-6} ~ 3820×10^{-6}), V(417×10^{-6} ~ 540×10^{-6}), 中等含量 Nb(25.3×10^{-6} ~ 83.6×10^{-6}) 和 Zr(102×10^{-6} ~ 351×10^{-6})。原始地幔标准化微量元素蛛网图显示(图 8b), 所有岩石具有 Rb、Ba、Sr、Nb、Ti、Ta 等元素富集, K、Hf、P 元素亏损的特征。Nb、Ta 相对富集, 可能与地壳物质混合关系不大, 显示幔源(Rollison, 1993; 杨凤超等, 2016)。Ti 的富集可能同岩体产于钛磁铁矿中, 钛铁矿未发生分离。

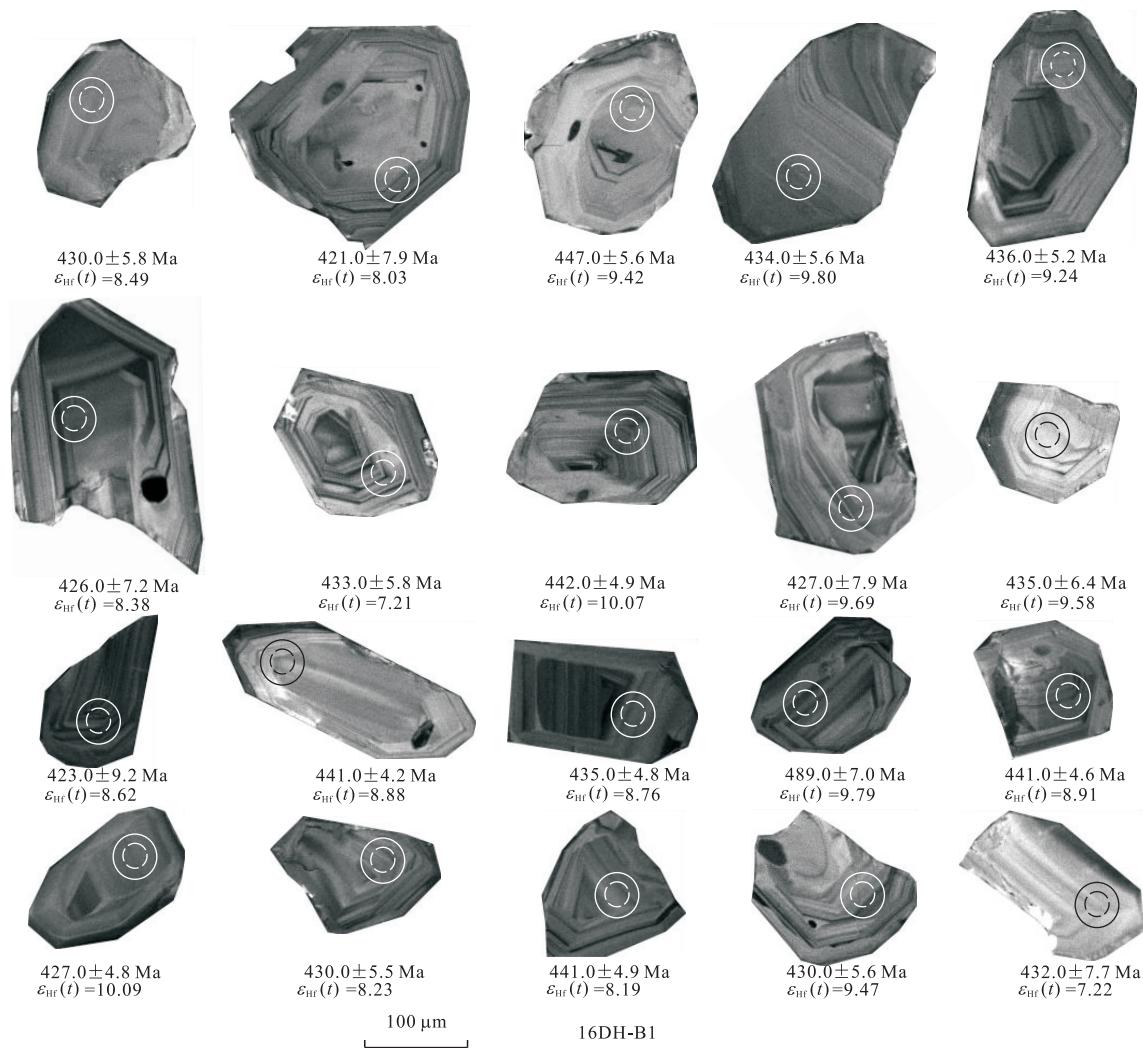


图5 扬子陆块北缘东河超基性岩锆石的CL图像和U-Pb年龄分析点(实线圆圈)及Lu-Hf同位素分析点(虚线圆圈)

Fig.5 CL images of zircons from the Donghe ultramafic rocks in northern margin of Yangtze platform and the points for U-Pb analysis (the solid circles) and Lu-Hf isotope analysis (dashed circles)

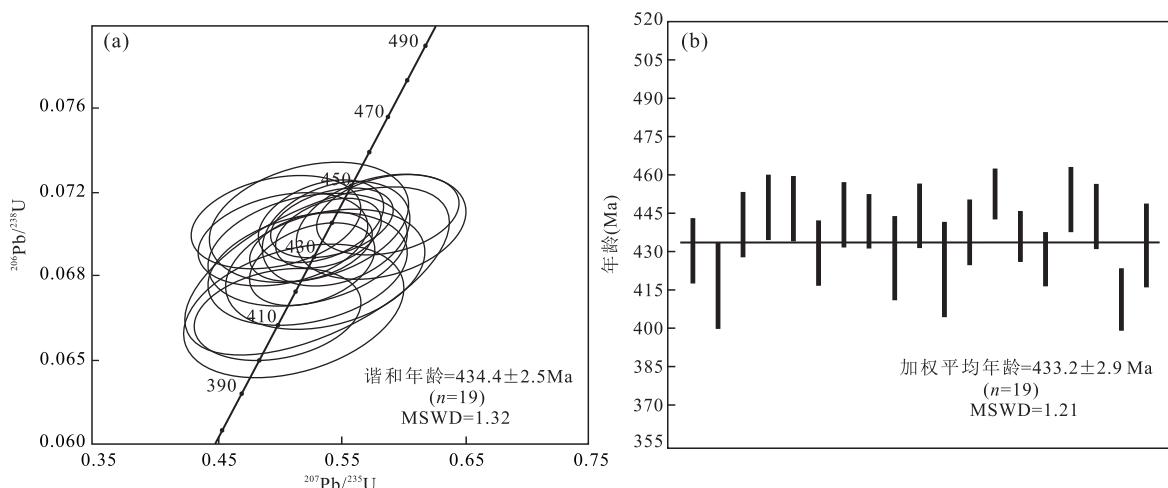


图6 超基性岩锆石U-Pb谐和图(a)和加权平均年龄图(b)

Fig.6 Zircon U-Pb concordia diagram (a) and weighted average age (b) for ultramafic rocks

表 2 东河超基性岩元素地球化学组成(主量元素:%;微量元素: 10^{-6})Table 2 Element compositions of the Donghe ultramafic rocks (major element: %; trace element: 10^{-6})

| 样品编号 | DH-B3 | DH-B4 | DH-B5 | DH-B8 | DH-B11 | DH-B13 | DH-B14 | DH-B15 | DH-B16 | DH-B17 |
|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 样品名称 | 蚀变 辉石岩 | 蚀变 辉石岩 | 含长 辉石岩 | 角闪 辉石岩 | 蚀变 辉石岩 | 蚀变 辉石岩 | 蚀变 辉石岩 | 蚀变 辉石岩 | 蚀变 辉石岩 | 蚀变 辉石岩 |
| SiO ₂ | 43.86 | 42.21 | 47.46 | 40.81 | 40.07 | 41.09 | 38.93 | 40.59 | 39.73 | 39.37 |
| Al ₂ O ₃ | 4.55 | 8.90 | 7.05 | 8.47 | 11.09 | 14.40 | 9.80 | 11.25 | 15.46 | 11.38 |
| Fe ₂ O ₃ | 7.32 | 8.10 | 4.79 | 7.74 | 8.21 | 9.03 | 10.08 | 5.92 | 11.86 | 10.52 |
| FeO | 9.07 | 8.11 | 6.25 | 9.82 | 9.09 | 4.97 | 8.64 | 10.32 | 2.22 | 7.62 |
| CaO | 12.77 | 13.44 | 17.06 | 12.82 | 13.41 | 16.58 | 14.40 | 11.70 | 20.59 | 12.38 |
| MgO | 16.24 | 10.14 | 12.23 | 12.77 | 8.69 | 5.92 | 8.71 | 9.01 | 8.56 | 8.49 |
| K ₂ O | 0.093 | 0.652 | 0.202 | 0.455 | 0.887 | 0.377 | 0.190 | 0.295 | 0.088 | 1.30 |
| Na ₂ O | 0.391 | 1.54 | 1.18 | 0.593 | 1.32 | 1.33 | 0.491 | 2.00 | 0.880 | 1.18 |
| TiO ₂ | 3.62 | 4.24 | 2.20 | 4.12 | 4.73 | 3.28 | 6.33 | 5.26 | 3.70 | 4.05 |
| P ₂ O ₅ | 0.054 | 0.238 | 0.189 | 0.066 | 0.621 | 1.04 | 0.041 | 0.723 | 0.780 | 0.614 |
| MnO | 0.186 | 0.171 | 0.174 | 0.215 | 0.225 | 0.101 | 0.166 | 0.249 | 0.063 | 0.176 |
| LOI | 1.98 | 2.70 | 1.33 | 2.20 | 1.39 | 2.22 | 2.34 | 2.11 | 2.41 | 2.36 |
| Total | 98.69 | 98.79 | 99.02 | 98.62 | 98.62 | 99.03 | 98.71 | 98.60 | 99.27 | 98.75 |
| Na ₂ O/K ₂ O | 4.20 | 2.36 | 5.84 | 1.30 | 1.49 | 3.53 | 2.58 | 6.78 | 10.00 | 0.91 |
| Mg [#] | 64.90 | 54.00 | 67.37 | 57.56 | 48.46 | 54.36 | 50.20 | 50.66 | 50.06 | 46.98 |
| La | 6.42 | 26.6 | 15.5 | 10.0 | 22.6 | 47.1 | 9.92 | 20.9 | 77.6 | 36.2 |
| Ce | 19.7 | 66.9 | 43.0 | 27.6 | 60.0 | 118 | 20.8 | 56.5 | 157 | 74.0 |
| Pr | 2.80 | 8.01 | 5.78 | 3.70 | 7.60 | 14.0 | 2.74 | 7.67 | 16.8 | 8.90 |
| Nd | 14.6 | 36.3 | 28.8 | 18.5 | 36.6 | 64.1 | 14.2 | 38.8 | 71.0 | 42.4 |
| Sm | 3.96 | 8.13 | 7.18 | 4.65 | 8.36 | 13.8 | 3.94 | 9.23 | 14.3 | 9.67 |
| Eu | 1.22 | 2.34 | 2.23 | 1.59 | 2.69 | 4.54 | 1.34 | 3.23 | 4.80 | 3.03 |
| Gd | 3.52 | 7.00 | 6.28 | 4.13 | 7.32 | 12.1 | 3.60 | 7.95 | 12.5 | 8.41 |
| Tb | 0.58 | 1.08 | 1.01 | 0.68 | 1.12 | 1.80 | 0.60 | 1.22 | 1.86 | 1.30 |
| Dy | 3.36 | 5.74 | 5.71 | 3.78 | 6.13 | 9.54 | 3.35 | 6.51 | 9.72 | 7.12 |
| Ho | 0.60 | 1.01 | 1.02 | 0.68 | 1.07 | 1.67 | 0.58 | 1.13 | 1.68 | 1.26 |
| Er | 1.40 | 2.36 | 2.39 | 1.57 | 2.45 | 3.83 | 1.34 | 2.61 | 4.00 | 2.93 |
| Tm | 0.19 | 0.31 | 0.32 | 0.22 | 0.31 | 0.48 | 0.18 | 0.33 | 0.51 | 0.38 |
| Yb | 1.10 | 1.77 | 1.92 | 1.29 | 1.78 | 2.68 | 1.00 | 1.89 | 2.91 | 2.17 |
| Lu | 0.14 | 0.21 | 0.24 | 0.16 | 0.22 | 0.31 | 0.12 | 0.23 | 0.34 | 0.26 |
| Y | 12.6 | 21.5 | 22.2 | 14.6 | 23.4 | 37.2 | 12.6 | 24.6 | 38.5 | 27.5 |
| ΣREE | 59.59 | 167.76 | 121.38 | 78.55 | 158.25 | 293.95 | 63.71 | 158.20 | 375.02 | 198.03 |
| LREE | 48.70 | 148.28 | 102.49 | 66.04 | 137.85 | 261.54 | 52.94 | 136.33 | 341.50 | 174.20 |
| HREE | 10.89 | 19.48 | 18.89 | 12.51 | 20.40 | 32.41 | 10.77 | 21.87 | 33.52 | 23.83 |
| LREE/HREE | 4.47 | 7.61 | 5.43 | 5.28 | 6.76 | 8.07 | 4.92 | 6.23 | 10.19 | 7.31 |
| La _N /Yb _N | 3.94 | 10.16 | 5.46 | 5.24 | 8.58 | 11.88 | 6.70 | 7.47 | 18.02 | 11.27 |
| δEu | 0.98 | 0.93 | 0.99 | 1.09 | 1.03 | 1.05 | 1.07 | 1.13 | 1.07 | 1.00 |
| δCe | 1.09 | 1.07 | 1.06 | 1.06 | 1.07 | 1.07 | 0.92 | 1.05 | 0.98 | 0.95 |
| Pb | 1.91 | 6.30 | 6.70 | 2.95 | 7.80 | 12.5 | 8.02 | 3.31 | 15.5 | 13.6 |
| Cr | 1.050 | 413 | 819 | 570 | 144 | 21.8 | 9.77 | 180 | 22.5 | 212 |
| Ni | 534 | 234 | 189 | 359 | 196 | 50.2 | 178 | 185 | 50.1 | 219 |
| Co | 95.8 | 94.8 | 60.2 | 93.2 | 77.9 | 92.7 | 52.3 | 77.7 | 166 | 74.7 |
| Rb | 4.12 | 18.0 | 5.65 | 12.1 | 21.3 | 8.57 | 5.50 | 7.87 | 3.05 | 39.8 |
| Sr | 624 | 521 | 550 | 410 | 837 | 2290 | 1120 | 806 | 3820 | 1300 |
| Ba | 51.5 | 76.8 | 145 | 46.9 | 28.6 | 24.3 | 30.2 | 59.9 | 26.4 | 36.2 |
| V | 350 | 451 | 324 | 438 | 540 | 516 | 620 | 417 | 499 | 462 |
| Sc | 61.8 | 55.9 | 73.3 | 56.8 | 58.4 | 26.8 | 56.1 | 40.7 | 22.5 | 39.5 |
| Nb | 14.6 | 32.6 | 10.2 | 16.2 | 25.3 | 47.6 | 22.8 | 35.2 | 83.6 | 36.9 |
| Ta | 0.21 | 1.24 | 0.50 | 0.36 | 0.77 | 1.84 | 0.90 | 1.69 | 4.19 | 1.48 |
| Zr | 87.1 | 193 | 113 | 119 | 127 | 213 | 114 | 102 | 351 | 138 |
| Hf | 1.98 | 4.94 | 3.24 | 3.03 | 3.50 | 5.10 | 3.13 | 2.61 | 9.30 | 3.72 |
| U | 0.10 | 0.62 | 0.11 | 0.18 | 0.20 | 0.79 | 0.14 | 0.14 | 2.30 | 0.43 |
| Th | 0.86 | 2.31 | 0.94 | 1.36 | 1.29 | 3.52 | 0.80 | 0.82 | 7.95 | 1.12 |

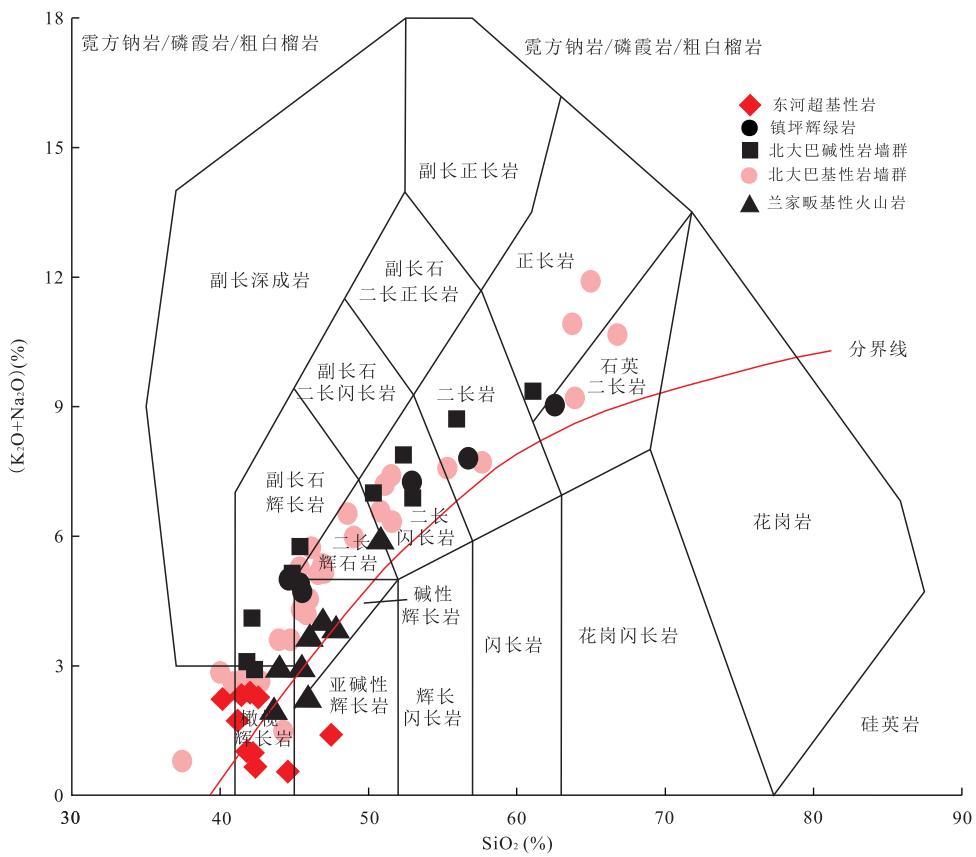


图7 扬子陆块北缘东河超基性岩 TAS 分类图解

Fig.7 TAS nomination diagram for rock classification from the Donghe ultramafic rocks in northern margin of Yangtze platform
据 Middlemost(1994); 镇坪辉绿岩数据来源于邹先武等(2011); 北大碱性岩墙群数据来源于张成立等(2002); 北大巴基性岩墙群数据来源于王存智等(2009); 兰家畈基性火山岩数据来源于董云鹏等(1998)

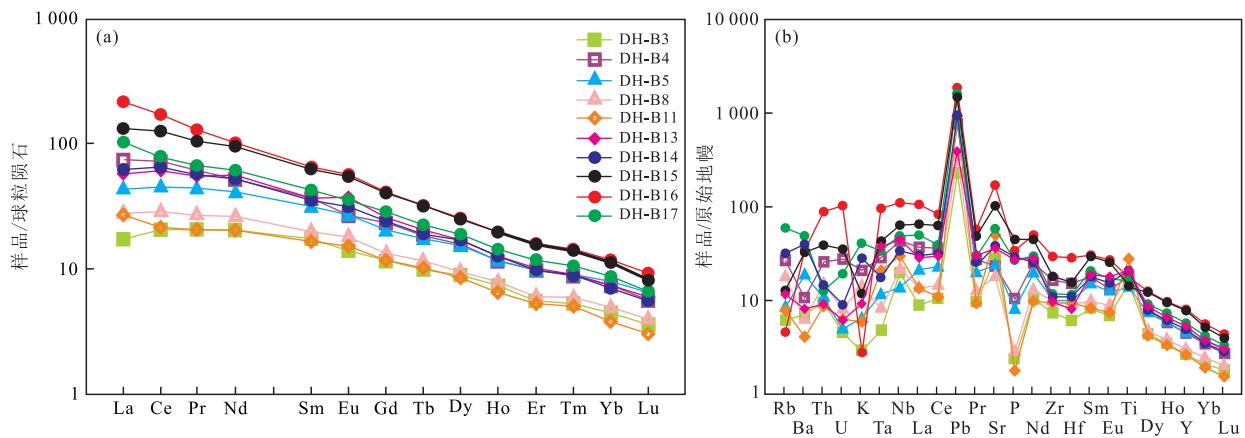


图8 东河超基性岩脉的球粒陨石标准化稀土配分图(a)和原始地幔标准化微量元素分布图(b)

Fig.8 Chondrite-normalized REE abundances (a) and primitive mantle-normalized trace element abundances (b) of the Donghe ultramafic rocks

标准化值据 Sun and McDonough(1989)

结晶有关P亏损指示磷灰石的分离结晶(刘金龙等,2016)。

3.3 锆石 Hf 同位素

本次研究在 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年研究

基础上,对锆石进行了微区 Hf 同位素分析,测试点序号与 U-Pb 测年点序号对应。分析结果见表 3。分析结果表明,锆石颗粒的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值均小于

表 3 东河地区超基性岩锆石原位 Hf 同位素组成
Table 3 Zircon Lu-Hf isotopic compositions of the Donghe ultramafic rocks

| 点号 | $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ | $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ | $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ | 2σ | 年龄(Ma) | $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ | $\epsilon_{\text{Hf}}(0)$ | $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ | $f_{\text{Lu/Hf}}$ | t_{DM} | t_{zDM} |
|--------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------|--------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------|-----------------|------------------|
| DH1-1 | 0.015 200 | 0.000 413 | 0.282 748 | 0.000 014 | 430 | 0.282 745 | -0.85 | 8.52 | -0.99 | 703 | 873 |
| DH1-2 | 0.012 661 | 0.000 364 | 0.282 775 | 0.000 017 | 421 | 0.282 737 | -1.17 | 8.03 | -0.99 | 714 | 898 |
| DH1-3 | 0.037 026 | 0.001 121 | 0.282 761 | 0.000 034 | 447 | 0.282 760 | -0.28 | 9.42 | -0.98 | 683 | 829 |
| DH1-4 | 0.032 398 | 0.000 885 | 0.282 756 | 0.000 017 | 434 | 0.282 778 | 0.35 | 9.77 | -0.99 | 656 | 794 |
| DH1-5 | 0.027 753 | 0.000 773 | 0.282 755 | 0.000 019 | 436 | 0.282 761 | -0.18 | 9.22 | -0.98 | 682 | 833 |
| DH1-6 | 0.027 525 | 0.000 733 | 0.282 751 | 0.000 016 | 426 | 0.282 744 | -0.71 | 8.39 | -0.97 | 708 | 877 |
| DH1-7 | 0.019 274 | 0.000 530 | 0.282 753 | 0.000 016 | 433 | 0.282 706 | -2.12 | 7.20 | -0.98 | 759 | 958 |
| DH1-8 | 0.022 381 | 0.000 621 | 0.282 796 | 0.000 020 | 442 | 0.282 782 | 0.50 | 10.09 | -0.98 | 652 | 782 |
| DH1-9 | 0.019 556 | 0.000 540 | 0.282 741 | 0.000 016 | 427 | 0.282 781 | 0.46 | 9.72 | -0.98 | 654 | 794 |
| DH1-10 | 0.028 259 | 0.000 765 | 0.282 735 | 0.000 018 | 435 | 0.282 772 | 0.11 | 9.58 | -0.99 | 665 | 809 |
| DH1-11 | 0.017 352 | 0.000 474 | 0.282 776 | 0.000 015 | 423 | 0.282 752 | -0.39 | 8.61 | -0.97 | 698 | 861 |
| DH1-12 | 0.010 994 | 0.000 321 | 0.282 739 | 0.000 016 | 441 | 0.282 749 | -0.57 | 8.90 | -0.97 | 701 | 858 |
| DH1-13 | 0.022 548 | 0.000 619 | 0.282 712 | 0.000 015 | 435 | 0.282 749 | -0.60 | 8.77 | -0.98 | 700 | 861 |
| DH1-14 | 0.019 478 | 0.000 535 | 0.282 764 | 0.000 016 | 489 | 0.282 744 | -0.74 | 9.79 | -0.98 | 705 | 837 |
| DH1-15 | 0.016 175 | 0.000 447 | 0.282 782 | 0.000 016 | 441 | 0.282 749 | -0.67 | 8.90 | -0.98 | 698 | 857 |
| DH1-16 | 0.024 815 | 0.000 683 | 0.282 767 | 0.000 016 | 427 | 0.282 791 | 0.85 | 10.08 | -0.98 | 640 | 771 |
| DH1-17 | 0.036 630 | 0.000 999 | 0.282 752 | 0.000 016 | 430 | 0.282 737 | -1.10 | 8.23 | -0.98 | 715 | 891 |
| DH1-18 | 0.025 703 | 0.000 689 | 0.282 712 | 0.000 016 | 441 | 0.282 729 | -1.31 | 8.19 | -0.98 | 728 | 903 |
| DH1-19 | 0.019 464 | 0.000 528 | 0.282 786 | 0.000 018 | 430 | 0.282 772 | 0.14 | 9.47 | -0.99 | 665 | 811 |
| DH1-20 | 0.020 349 | 0.000 563 | 0.282 785 | 0.000 015 | 432 | 0.282 707 | -2.12 | 7.22 | -0.98 | 757 | 957 |

表 4 东河超基性岩脉全岩 Sr-Nd 同位素组成
Table 4 Whole-rock isotope compositions of the Donghe ultramafic rocks

| 样品号 | $\text{Rb}(10^{-6})$ | $\text{Sr}(10^{-6})$ | $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ | $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ | 2σ | $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ | $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ | | |
|--------|----------------------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| DH-B3 | 1.574 | 52.14 | 0.087 010 | 0.703 88 | 5 | 0.703 34 | -9.2 | | |
| DH-B4 | 18.170 | 471.30 | 0.111 100 | 0.704 22 | 3 | 0.703 53 | -6.5 | | |
| DH-B5 | 4.454 | 486.90 | 0.026 370 | 0.704 02 | 5 | 0.703 86 | -1.9 | | |
| DH-B8 | 12.670 | 368.00 | 0.099 180 | 0.703 87 | 3 | 0.703 26 | -10.4 | | |
| DH-B11 | 4.512 | 1 006.00 | 0.012 920 | 0.704 23 | 7 | 0.704 15 | 2.3 | | |
| DH-B13 | 7.335 | 703.20 | 0.030 060 | 0.703 71 | 2 | 0.703 52 | -6.7 | | |
| DH-B14 | 21.550 | 720.40 | 0.086 190 | 0.704 17 | 4 | 0.703 64 | -5.0 | | |
| DH-B15 | 6.942 | 2 148.00 | 0.009 312 | 0.704 04 | 2 | 0.703 98 | -0.1 | | |
| DH-B16 | 2.164 | 2 945.00 | 0.002 117 | 0.704 06 | 3 | 0.704 05 | 0.9 | | |
| DH-B17 | 43.320 | 1 207.00 | 0.103 400 | 0.704 40 | 1 | 0.703 76 | -3.3 | | |
| 样品号 | $\text{Sm}(10^{-6})$ | $\text{Nd}(10^{-6})$ | $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ | $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ | $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ | I_{Nd} | $f_{\text{Sm/Nd}}$ | $t_{\text{DM}}(\text{Ga})$ | $t_{\text{zDM}}(\text{Ga})$ |
| DH-B3 | 3.781 | 14.03 | 0.163 0 | 0.512 782 | 4.68 | 0.512 320 | -0.17 | 1.111 | 0.792 |
| DH-B4 | 7.820 | 35.28 | 0.134 1 | 0.512 705 | 4.78 | 0.512 325 | -0.32 | 0.855 | 0.784 |
| DH-B5 | 6.866 | 27.99 | 0.148 4 | 0.512 760 | 5.05 | 0.512 339 | -0.25 | 0.914 | 0.761 |
| DH-B8 | 4.404 | 17.53 | 0.152 0 | 0.512 755 | 4.76 | 0.512 324 | -0.23 | 0.980 | 0.785 |
| DH-B11 | 3.780 | 13.90 | 0.164 5 | 0.512 813 | 5.21 | 0.512 347 | -0.16 | 1.050 | 0.749 |
| DH-B13 | 8.882 | 37.71 | 0.142 5 | 0.512 713 | 4.47 | 0.512 309 | -0.28 | 0.939 | 0.809 |
| DH-B14 | 8.193 | 36.16 | 0.137 1 | 0.512 718 | 4.86 | 0.512 329 | -0.30 | 0.863 | 0.777 |
| DH-B15 | 13.780 | 65.28 | 0.127 7 | 0.512 696 | 4.96 | 0.512 334 | -0.35 | 0.808 | 0.770 |
| DH-B16 | 14.550 | 73.34 | 0.120 0 | 0.512 690 | 5.27 | 0.512 350 | -0.39 | 0.751 | 0.744 |
| DH-B17 | 9.849 | 43.50 | 0.137 0 | 0.512 692 | 4.37 | 0.512 304 | -0.30 | 0.914 | 0.818 |

0.001 70,其平均值为 0.000 63,显示锆石在形成之后具有极低的放射性成因 Hf 的积累,因此测定的值可以代表锆石结晶时 Hf 同位素组成(吴福元等,2007). $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化范围为 0.282 712~

0.282 796,具有相对集中且很高的锆石 Hf 同位素初始比值 [$\epsilon_{\text{Hf}}(t) = 7.29 \sim 10.26$]. $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值为 -0.97~-0.99,明显小于镁铁质地壳的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值 -0.34(Amelin *et al.*, 1999)和硅铝质地壳的 $f_{\text{Lu/Hf}}$

值 -0.72 (Vervoort *et al.*, 1996),故二阶段模式年龄更能反映源区物质从亏损地幔被抽取的时间(吴福元等,2007).测定单阶段 Hf 模式年龄(t_{DM})介于 $652\sim759$ Ma,平均为 694 Ma;二阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2})介于 $771\sim957$ Ma,平均为 852 Ma,大于前文所测定的辉石岩结晶年龄(433 Ma).

3.4 Sr-Nd 同位素

东河辉石岩的 Sr、Nd 同位素分析结果列于表 4. $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 变化于 $0.0021\sim0.1111$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 $0.70371\sim0.70440$,低于原始地幔现代值(0.70450 , Depaolo and Wasserburg, 1976), $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 介于 $0.1200\sim0.1630$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 为 $0.512690\sim0.512813$,高于原始地幔现代值(0.512638),具有低 Sr 高 Nd 的特征.

根据本次测定的锆石 U-Pb 加权平均年龄 433 Ma 进行计算, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 比值变化于 $0.70326\sim0.70415$,初始比值变化范围较小。 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 >0 ,介于 $4.37\sim5.27$. $f_{\text{Sm/Nd}}$ 值均为负值,有 7 个数据偏离了大陆地壳平均值($0.3\sim0.5$),用单阶段模式计算 Nd 同位素模式年龄会产生较大的偏差,故采用两阶段模式(李献华,1996),通过计算获得 Nd 同位素两阶段模式年龄 t_{DM2} 为 $744\sim818$ Ma,为新元古代时期.

4 讨论

4.1 成岩时代

大巴山地区基性—超基性岩浆岩分布在陕、鄂两省交界的紫阳、岚皋及湖北的竹溪、房县等地,地质构造位置属于扬子板块北缘早古生代陆缘区.区内主要的侵入岩有北大巴山地区的基性岩墙群、凤凰山岩体、岚皋地区基性火山岩、镇坪地区的基性岩脉及房县西部东河地区的辉绿玢岩、辉石岩岩脉.岩石类型以辉绿岩、辉长岩为主.

前人对北大巴基性岩墙中的岩浆锆石进行了 U-Pb 同位素定年,获得岩体结晶年龄为 431.0 ± 3.2 Ma 和 433.3 ± 4.1 Ma(王存智等,2009),对镇坪地区辉绿岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果为 439 ± 6.0 Ma(邹先武等,2011),对镇坪县茨竹基性侵入体全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 447.9 ± 10.6 Ma(何建坤,1999).

东河地区存在两期基性—超基性侵入体.第一期为辉绿玢岩,岩体成岩床产出,与震旦系、下寒武统一下志留统接触(图 2).曹亮等(2015)对该期侵入岩进

行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,获得的年龄为 439.3 ± 4.1 Ma.本次研究对东河地区的第二期辉石岩岩脉进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年,获得的年龄为 433.2 ± 2.9 Ma.通过以上研究结果表明,东河地区两期基性—超基性岩床(脉)可能与北大巴山地区的基性岩墙为同期岩浆活动的产物.

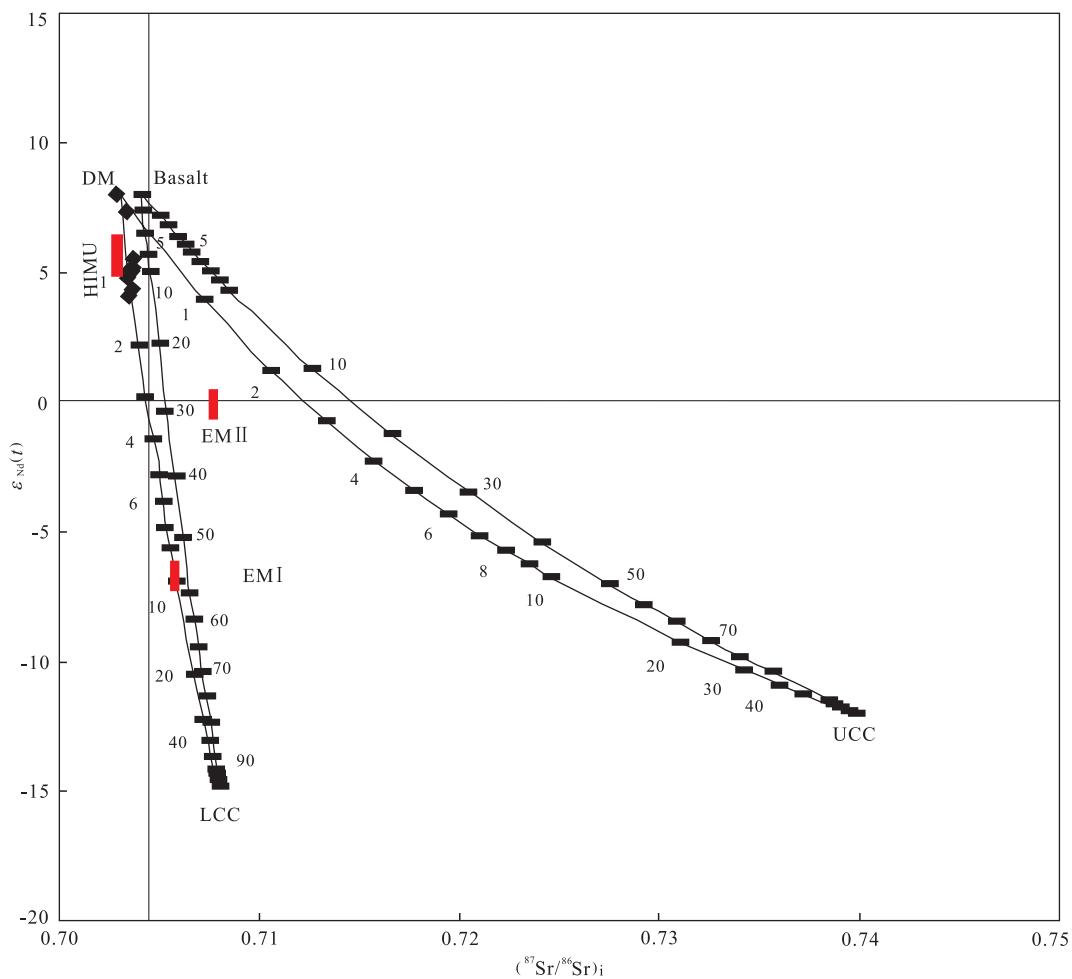
4.2 地壳混染

东河超基性岩脉辉石岩样品的 Nb/Ta 比值变化于 $15.6\sim45.0$,平均值为 30.6 ,Zr/Hf 比值变化于 $34.8\sim43.9$,平均值为 38.5 .其 Nb/Ta 和 Zr/Hf 比值都高于大陆地壳值($\text{Nb}/\text{Ta}=11$, $\text{Zr}/\text{Hf}=33$),说明超基性脉的岩浆受到地壳混染影响不明显(Weaver, 1991; Green, 1995; Kalfoun *et al.*, 2002).这也与前人的研究结果一致(王存智等,2009).由于没有经历明显的地壳混染作用,富集大离子亲石元素和 LREE 只能是继承了地幔源区的性质.该区岩石中 $\text{Nb}/\text{Ta}=15.7\sim45.0$,9 个样品值高于球粒陨石相应值,可能体现了岩浆源区 Nb 和 Ta 的寄主矿物(如金红石)与俯冲板块底部部分熔融产生的硅酸盐岩浆之间存在着相互关系(Münker, 1998).东河超基性岩具有很高的 Nb/U($36.4\sim251.4$),可能是通过再循环的洋壳通过俯冲带(高 Nb/U)进入地幔源引起的.

幔源岩浆在上升或者侵位过程中通常会受到不同程度地壳物质的混染(Mohr, 1987),东河超基性岩富集大离子亲石元素(Rb,Sr)和轻稀土元素,亏损高场强元素(Zr,Hf),且具有比原始地幔($\text{Ta}/\text{La}=0.06$)(Wood *et al.*, 1979)低的 Ta/La 比值(均值 0.05),以上特征表明在成岩过程中可能存在地壳物质的混染.同时我们采用两端元混合计算方式来检验陆壳物质的混染程度.以亏损地幔与上地壳作为两端元以及亏损地幔与下地壳作为两端元分别进行混合计算,结果表明岩浆上升侵位的过程中,下地壳物质的混染程度为 $1\%\sim2\%$ (图 9).

4.3 岩浆源区特征

一般来说岩浆锆石低于同期亏损地幔的正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值则说明其岩浆源区具有富集地幔的特征(Zheng *et al.*, 2006).东河地区超基性岩脉 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $+7.25\sim+10.26$,在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ —锆石 U-Pb 年龄图解中(图 10),所有数据点都落在球粒陨石和亏损地幔之间,说明东河地区超基性岩脉形成于 Hf 同位素相对亏损的地幔源区.对于幔源岩浆而言,如果锆石母岩浆直接来源于未受任何影响的亏损地幔,那么锆石结晶年龄应近似等于锆石 Hf 模式年龄.而

图 9 东河超基性岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解Fig.9 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ vs. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram for the Donghe ultramafic rocks

其中数字表示地壳物质参与的比例,计算采用的参数 $\text{Nd}(10^{-6})$ 、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、 $\text{Sr}(10^{-6})$ 、 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值如下:软流圈地幔(DM)分别为 1.2、+8、20 和 0.703;玄武岩分别为 15、+8、200 和 0.704;上地壳(UCC)分别为 30、-12、250 和 0.740,据 Jahn *et al.*(2000);下地壳(LCC)分别为 20、-15、230 和 0.708,据 Wu *et al.*(2000)

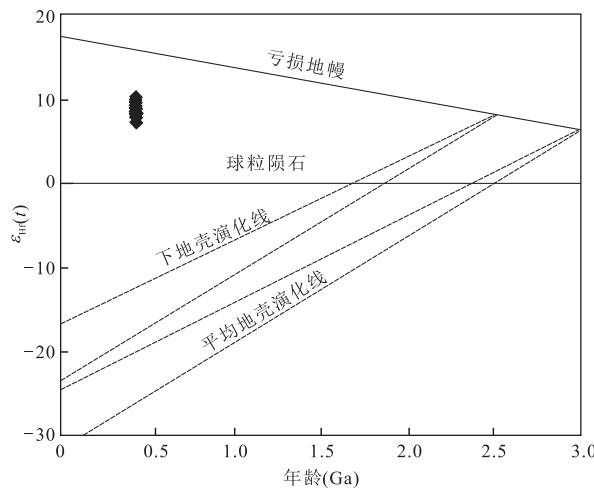
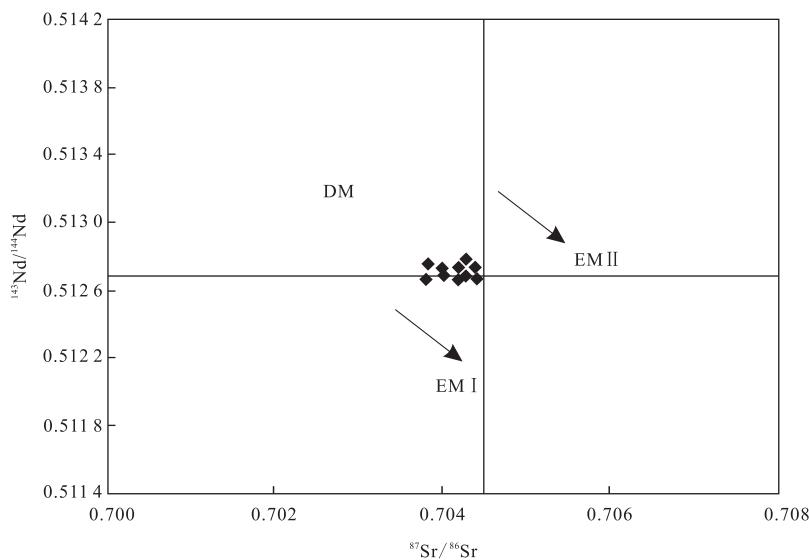


图 10 东河超基性脉岩锆石 Hf 同位素特征

Fig.10 Zircon Hf isotopic features of the Donghe ultramafic dyke

本区超基性岩锆石单阶段亏损地幔 Hf 模式年龄 t_{DM1} 介于 652~759 Ma, 平均为 694 Ma, 大于锆石结晶年龄 433 Ma, 造成这种现象的原因可能为源区加入了富集的物质组分(吴福元等, 2007)。在 Sr-Nd 同位素图解(图 11)上, 东河超基性岩大部分样品落在亏损地幔的范围内, 有个别样品落入 EM I 型富集地幔区域内, 显示有 EM I 型富集地幔组分的加入, 此特征与邻区紫阳—岚皋地区早古生代基性岩类的源区特征类似(张成立等, 2007)。

前文已经分析, 东河超基性岩脉在成岩过程中遭受地壳物质的混染不明显, 所以最有可能是源区加入了富集的岩石圈地幔, 即源区经历俯冲过程中的流体交代作用。样品具有相对较高的 Th/Yb 比值(0.52~2.73), 在 Nb/Yb—Th/Yb 图解中投点均偏离 MORB-OIB 演化线(图 12a), 暗示其源区受到俯冲组分的影

图 11 东河超基性岩 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 对 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 相关图解Fig.11 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ plot for the Donghe ultramafic rocks

DM. 亏损地幔, EM I、EM II. 富集地幔, 据 Zindler and Hart(1986)

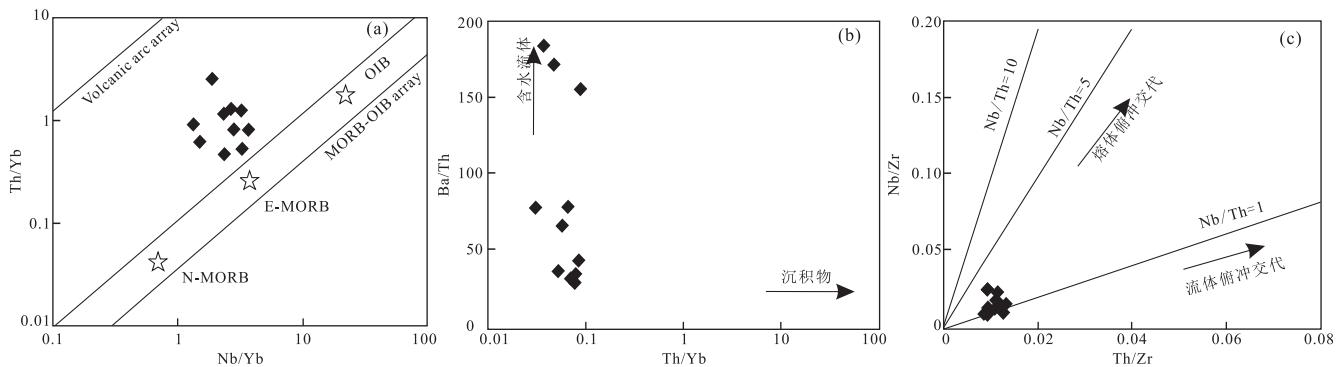


图 12 东河超基性岩脉 Th/Yb-Nb/Yb(a)、Ba/Th-TH/Nb(b) 和 Nb/Zr-Th/Zr(c) 图解

Fig.12 Th/Yb-Nb/Yb (a), Ba/Th-TH/Nb (b) and Nb/Zr-Th/Zr (c) diagrams of the Donghe ultramafic rocks

a. 据 Pearce(2008); b. 据 Hanyu et al.(2006); c. 据 Woodhead et al.(2001)

响。微量元素比值(Ba/Th、Th/Nb、Nb/Zr 和 Th/Zr)可以有效地识别含水流体或者俯冲带沉积物。在 Ba/Th-TH/Nb 图解中(图 12b), 投点显示含水流体的演化趋势。在 Nb/Zr-Th/Zr 图解中, 样品显示流体俯冲交代的趋势(图 12c)。以上特征指示有含水流体进入岩浆地幔源区。因此, 笔者认为岩浆源区加入了富集岩石圈地幔组分, 这种富集岩石圈地幔主要是由于早期大洋俯冲阶段流体交代形成。

综上所述, 东河超基性岩脉的岩浆受到地壳混染影响不明显, 岩浆在上升侵位的过程中, 下地壳物质的混染程度为 1%~2%。超基性岩脉为地幔部分熔融的产物, 可能是通过再循环的洋壳通过俯冲带(高 Nb/U)进入地幔源引起的。Sr-Nd-Hf 同位素特征显示, 岩浆主要源区为亏损地幔, 但是有 EM I 型

富集地幔组分的加入。

4.4 构造意义

从大地构造演化历史来看, 研究区古生代属于扬子陆块北缘向北俯冲板块的被动大陆边缘, 发育了近乎连续的寒武纪—三叠纪地层, 在陕西紫阳、岚皋、镇坪以及湖北竹溪等地出露的早古生代地层中发育了碱性超基性—基性脉岩和火山岩的岩浆杂岩带。为进一步地认识东河超基性岩脉的构造背景, 我们运用了多种构造环境判别图。Zr、Y、Nb 和 Ti 等不相容元素受部分熔融或分离结晶作用的影响较小(Pearce and Cann, 1973; Pearce and Norry, 1979; Mullen, 1983; Meschede, 1986), 因此, 利用这些元素能有效地讨论其形成的构造环境。

在 Zr-Zr/Y 图解中, 东河超基性岩辉石岩样

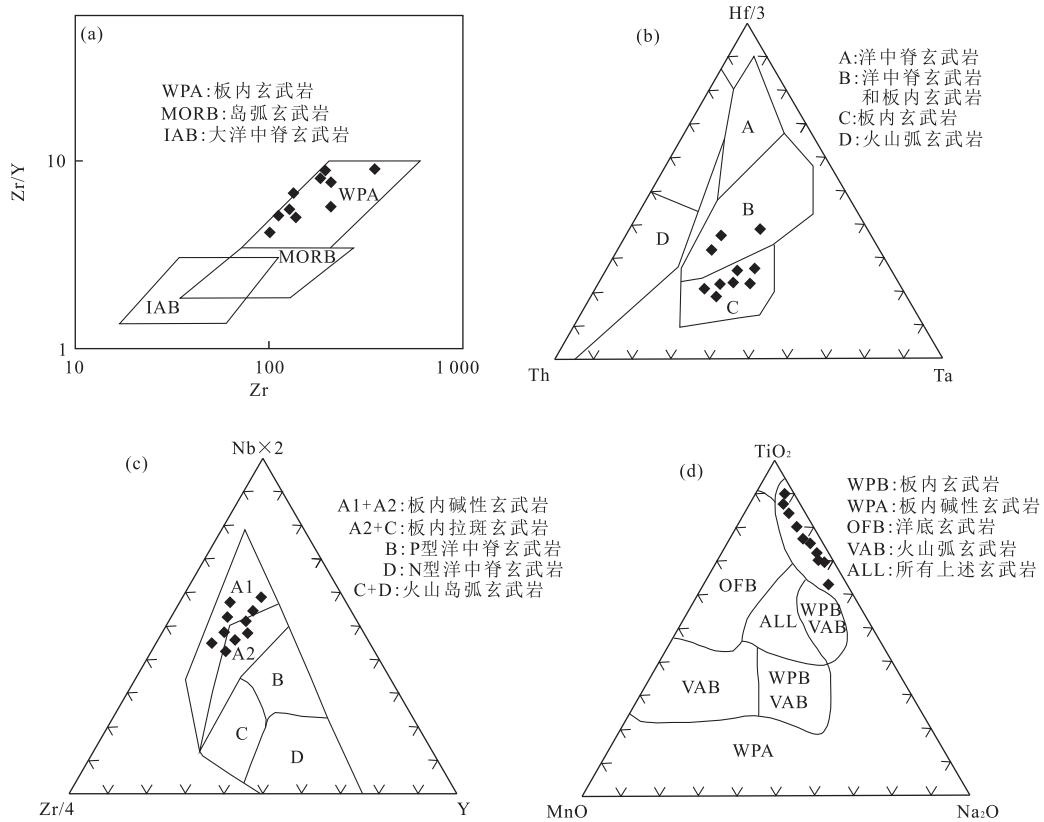


图 13 东河超基性岩脉构造环境判别图

Fig.13 Discrimination diagrams of tectonic settings for the Donghe ultramafic rocks

a.据 Pearce(1979); b.据 Wood(1979); c.据 Meschede(1986); d.据 Nisbet *et al.*(1977)

品位于板内玄武岩(图 13a),表明研究区的辉石岩形成于板内环境。在 Th—Hf/3—Ta 判别图解中(图 13b),辉石岩落入板内玄武岩和洋中脊玄武岩区域内,但是大部分样品都位于板内玄武岩内,主要显示为板内玄武岩的化学特征。Zr/4—Y—2Nb 图解中,一部分样品落入板内碱性玄武岩区域,一部分样品落入板内玄武岩区域(图 13c)。火成岩中的辉石的组分受结晶时岩浆成分、温度、压力等因素控制,因此辉石的化学成分指示母岩浆类型,其分异演化趋势代表了母岩浆的分异演化趋势。可以通过辉石岩中的 TiO_2 、 MnO 、 Na_2O 含量判别大地构造环境。在 TiO_2 — MnO — Na_2O 图解中(图 13d),辉石岩样品都落入 WPA 区域,显示了板内碱性玄武岩的化学特征。东河超基性岩脉的地球化学特征与北大巴基性岩墙群及北大巴镇坪地区辉绿岩的地球化学特征基本一致,都具有右倾型的稀土配分模式和选择性富集大离子亲石元素的特征,暗示它们形成于相似的构造环境,即形成于板内构造环境。

在陕西紫阳、岚皋、镇坪以及湖北竹溪等地出露的早古生代地层中发育的碱性超基性—基性脉岩和

火山岩,形成于 431~447 Ma,属于志留世,岩石的成因与地幔活动造成大陆裂谷作用有关。此时扬子板块北缘在新元古代—早古生代期间为被动大陆边缘,处于拉张裂解的构造环境(吉让寿等,1990;何建坤,1999;王存智等,2009;邹先武等,2011)。中—晚古生代时,南秦岭构造带发生大规模基性岩浆活动及其西侧紫阳—岚皋等地的古生代碱性岩浆活动,呈近东西向延伸(胡健民等,2002)。大巴山地区古生代地层中发育的岩浆活动带可能是加里东晚期该地区岩石圈处于拉张状态下大陆裂谷作用的产物,其构造环境为扬子板块北缘板内主动裂谷作用(黄月华等,1992;何建坤,1999)。大陆裂谷作用代表了地壳的伸展拉张,裂谷作用形成的典型岩石组合为拉斑玄武岩及碱性玄武岩,以碱性玄武岩为主的岩石组合代表裂谷早期阶段的产物。由于扬子北缘新元古代早期的大洋地壳的俯冲消减作用,扬子北缘大洋地壳俯冲消减及其携带的陆源沉积物再循环进入亏损软流圈地幔,并且自新元古代中期(约 800 Ma)以来一直持续到早古生代末期(约 433 Ma)(张成立等,2007),此特征也暗示扬子陆块北缘与秦岭造山

带新元古代中期—早古生代末期的深部地幔动力学背景一致,表现为长期伸展拉张的构造演化背景(邹先武等,2011)。此次研究的辉石岩测得的锆石U-Pb年龄为433 Ma,属于早志留世,此时期包括南秦岭在内的扬子板块北缘仍保持被动大陆边缘扩展裂陷,其伸展构造活动受扬子板块北缘主动裂谷作用的影响。中志留世之前的早古生代该区深部存在与地幔活动有关的岩浆作用,导致了早古生代的伸展活动(张本仁,2001;张成立等,2002,2007)。在与火山岩互层的沉积岩中获得的丰富牙形石等化石证明在寒武—志留纪该区存在裂谷盆地(倪世钊等,1994)。

此次的定年结果与研究区伸展拉张构造演化阶段的末期(433 Ma)相近,正处于该地区大洋地壳俯冲影响结束后的板内裂谷时期。因此笔者认为扬子陆块北缘东河地区在早志留世应处于张裂状态,研究区出露的两期超基性岩床(脉)为岩石圈处于拉张状态下大陆裂谷早期阶段的产物。

5 结论

(1)LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学指示,东河地区超基性辉石岩体侵位时间为 433.2 ± 2.9 Ma(MSWD=1.21),与第一期侵入岩辉绿玢岩(439.3 Ma)为同期岩浆活动的产物。

(2)东河超基性岩体岩石主量元素总体显示出低硅、低镁、高铝的特征,属于高铝质超基性岩;岩石富集Rb、Ba、Sr、Nb、Ti等元素,相对富集K、Hf、P等元素。辉石岩锆石具有相对富集的Sr-Nd同位素组成, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 介于0.703 26~0.704 15, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 介于4.37~5.27。锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为0.282 712~0.282 796,对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=7.29 \sim 10.26$ 。Sr-Nd-Hf研究认为其源区主要为亏损地幔,可能有早期流体交代的富集岩石圈地幔组分的加入,岩浆在上升侵位的过程中地壳物质的混染不明显。

(3)构造环境分析表明,东河超基性岩脉形成于板内构造环境,结合区域构造演化分析,东河超基性岩脉是在早古生代末期(433 Ma),扬子陆块北缘大洋地壳俯冲影响结束后的板内裂谷时期内,在岩石圈处于拉张状态下大陆裂谷早期阶段上升侵位的产物。

致谢:湖北省地质调查院黄景孟工程师以及本项目组人员对野外工作给予了大量的帮助;匿名审稿专家对文章提出了宝贵的意见和建议,在此一并表示衷心感谢!

表1见本刊官网(<http://www.earth-science.net>)

References

- Amelin, Y., Lee, D.C., Halliday, A.N., et al., 1999. Nature of the Earth's Earliest Crust from Hafnium Isotopes in Single Detrital Zircons. *Nature*, 399(6733): 252—255. <https://doi.org/10.1038/20426>
- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses that do not Report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1—2): 59—79. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(02\)00195-x](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(02)00195-x)
- Blichert-Toft, J., Albarède, F., 1997. The Lu-Hf Isotope Geochemistry of Chondrites and the Evolution of the Mantle-Crust System. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1—2): 243—258. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(97\)00040-x](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(97)00040-x)
- Cao, L., Zhang, Q.X., Hu, S.J., et al., 2015. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age of Diabase Porphyry from the Donghe Area, Fangxian in South Daba Mountain and Its Tectonic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 89(12): 2314—2322(in Chinese with English abstract).
- Corfu, F., Hanchar, J.M., Hoskin, P.W.O., et al., 2003. Atlas of Zircon Textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 469—495. <https://doi.org/10.2113/0530469>
- DePaolo, D.J., Wasserburg, G.J., 1976. Inferences about Magmatic Sources and Mantle Structure from Variations of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$. *Geophysical Research Letters*, 3(12): 743—746. <https://doi.org/10.1029/gl003i012p00743>
- Dong, Y.P., Shen, Z.Y., Xiao, A.C., et al., 2011. Construction and Structural Analysis of Regional Geological Sections of the Southern Daba Shan Thrust-fold Belts. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3): 689—698(in Chinese with English abstract).
- Dong, Y.P., Zhou, D.W., Zhang, G.W., et al., 1998. Geochemistry of the Caledonian Basic Volcanic Rocks in the South Margin of Qinling Orogenic Belt and Their Tectonic Implications. *Geochimica*, 27(5): 432—441(in Chinese with English abstract).
- Feng, Y. M., Cao, X. D., Zhang, E. P., et al., 2002. Texture, Orogenic Process and Dynamics of the West Qinling Orogenic Belt-Geotectonic Map of the West Qinling Orogenic Belt and Its Neighbourings in 1:1 000 000-Scale. Xi'anCartographic Press, Xi'an (in Chinese).
- Green, T. H., 1995. Significance of Nb/Ta as an Indicator of Geochemical Processes in the Crust-Mantle System. *Chemical Geology*, 120(3—4): 347—359. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00145-x](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00145-x)
- Griffin, W.L., Pearson, N.J., Belousova, E., et al., 2000. The Hf Isotope Composition of Cratonic Mantle: LA-MC-

- ICPMS Analysis of Zircon Megacrysts in Kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133–147. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(99\)00343-9](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(99)00343-9)
- Griffin, W. L., Wang, X., Jackson, S. E., et al., 2002. Zircon Chemistry and Magma Mixing, SE China: In-Situ Analysis of Hf Isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes. *Lithos*, 61(3/4): 237–269. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(02\)00082-8](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(02)00082-8)
- Hanyu, T., Tatsumi, Y., Nakai, S., et al., 2006. Contribution of Slab Melting and Slab Dehydration to Magmatism in the NE Japan Arc for the Last 25 Myr: Constraints from Geochemistry. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7(8): 1–29. <https://doi.org/10.1029/2005gc001220>
- He, J.K., Lu, H.F., Zhu, B., 1999. The Tectonic Inversion and Its Geodynamic Processes in Northern Daba Mountains of Eastern Qinling Orogenic Belt. *Scientia Geologica Sinica*, 34(2): 139–153 (in Chinese with English abstract).
- Hoskin, P. W. O., Schaltegger, U., 2003. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27–62. <https://doi.org/10.2113/0530027>
- Hu, J.M., Men, Q.R., Bai, W.M., et al., 2002. Mid-Late Paleozoic Extension of the Wudang Block in the South Qinling Tectonic Belt, China. *Geological Bulletin of China*, 21(8–9): 471–477 (in Chinese with English abstract).
- Hu, Z.C., Liu, Y.S., Gao, S., et al., 2012. Improved in Situ Hf Isotope Ratio Analysis of Zircon Using Newly Designed X Skimmer Cone and Jet Sample Cone in Combination with the Addition of Nitrogen by Laser Ablation Multiple Collector ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27(9): 1391. <https://doi.org/10.1039/c2ja30078h>
- Huang, Y. H., 1993. Mineralogical Characteristics of Phlogopite-Amphibole-Pyroxenite Mantle Xenoliths Included in the Alkali Mafic-Ultramafic Subvolcanic Complex from Langao County, China. *Acta Petrologica Sinica*, 9(4): 367–378 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Y. H., Ren, Y. Y., Xia, L. X., et al., 1992. Early Palaeozoic Bimodal Igneous Suite on Northern Daba Mountains-Gaotan Diabase and Haoping Trachyte as Examples. *Acta Petrologica Sinica*, 8(3): 243–256 (in Chinese with English abstract).
- Jahn, B. M., Wu, F. Y., Hong, D. W., 2000. Important Crustal Growth in the Phanerozoic: Isotopic Evidence of Granitoids from East-Central Asia. *Journal of Earth System Science*, 109(1): 5–20. <https://doi.org/10.1007/bf02719146>
- Ji, R. S., Qin, D. Y., Gao, C. L., 1990. Closing of Eastern Qingling Palaeocean and Collaging Between the North China and Yangtze Blocks. *Experimental Petroleum Geology*, 12(4): 353–365 (in Chinese with English abstract).
- Kalfoun, F., Ionov, D., Merlet, C., 2002. HFSE Residence and Nb/Ta Ratios in Metasomatised, Rutile-Bearing Mantle Peridotites. *Earth and Planetary Science Letters*, 199(1–2): 49–65. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(02\)00555-1](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(02)00555-1)
- Li, C. Y., Liu, Y. W., Zhu, B. Q., et al., 1978. Tectonic Development of the Qinling and Qilian Mountains. In: *Geological Memoir of International Exchange(1)*. Geological Publishing House, Beijing, 174–187 (in Chinese).
- Li, C. Y., Wang, Q., Liu, X. Y., et al., 1982. Explanatory Notes to the Tectonic Map of Asia. Cartographic Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Li, X. H., 1996. A Discussion on the Model and Isochron Ages of Sm-Nd Isotopic Systematics: Suitability and Limitation. *Scientia Geologica Sinica*, 31(1): 97–104 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. L., Sun, F. Y., Zhang, Y. J., et al., 2016. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Hf Isotopes of Nankouqian Granitic Intrusion in Qingyuan Region, Liaoning Province. *Earth Science*, 41(1): 55–66 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Gao, S., Hu, Z., et al., 2010b. 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. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Zong, K. Q., et al., 2010a. Reappraisal and Refinement of Zircon U-Pb Isotope and Trace Element Analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535–1546. <https://doi.org/10.1007/s11434-010-3052-4>
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*, 4: 1–70.
- Meschede, M., 1986. A Method of Discriminating between Different Types of Mid-Ocean Ridge Basalts and Continental Tholeiites with the Nb-Zr-Y Diagram. *Chemical Geology*, 56(3–4): 207–218. [https://doi.org/10.1016/0008-4009\(86\)85003-2](https://doi.org/10.1016/0008-4009(86)85003-2)

- 1016/0009-2541(86)90004-5
- Middlemost, E.A.K., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth-Science Reviews*, 37 (3–4): 215–224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Mohr, P.A., 1987. Crustal Contamination in Mafic Sheets: A Summary. In: Halls, H. C., Fahrig, W. C., eds., *Mafic Dyke Swarms. Special Publication-Geological Association of Canada*, 34: 75–80.
- Mullen, E. D., 1983. MnO/TiO₂/P₂O₅: A Minor Element Discriminant for Basaltic Rocks of Oceanic Environments and its Implications for Petrogenesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 62 (1): 53–62. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(83\)90070-5](https://doi.org/10.1016/0012-821x(83)90070-5)
- Münker, C., 1998. Nb/Ta Fractionation in a Cambrian Arc/back Arc System, New Zealand: Source Constraints and Application of Refined ICPMS Techniques. *Chemical Geology*, 144 (1–2): 23–45. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(97\)00105-8](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(97)00105-8)
- Ni, S.Z., Yang, D.L., 1994. Paleozoic Strata and Sedimentary Facies of the Southern Belt in the Eastern Section of East Qinling Mountains. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Nisbet, E.G., Pearce, J.A., 1977. Clinopyroxene Composition in Mafic Lavas from Different Tectonic Settings. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 63 (2): 149–160. <https://doi.org/10.1007/bf00398776>
- Pearce, J.A., 2008. Geochemical Fingerprinting of Oceanic Basalts with Applications to Ophiolite Classification and the Search for Archean Oceanic Crust. *Lithos*, 100 (1–4): 14–48. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016>
- Pearce, J.A., Cann, J.R., 1973. Tectonic Setting of Basic Volcanic Rocks Determined Using Trace Element Analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19 (2): 290–300. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(73\)90129-5](https://doi.org/10.1016/0012-821x(73)90129-5)
- Pearce, J.A., Norry, M.J., 1979. Petrogenetic Implications of Ti, Zr, Y, and Nb Variations in Volcanic Rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69 (1): 33–47. <https://doi.org/10.1007/bf00375192>
- Robertson, A.H.F., 1994. Role of the Tectonic Facies Concept in Orogenic Analysis and Its Application to Tethys in the Eastern Mediterranean Region. *Earth-Science Reviews*, 37 (3/4): 139–213. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90028-0](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90028-0)
- Rollison, H.R., 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman Group UK, London.
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42 (1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Vervoort, J.D., Patchett, P.J., Gehrels, G.E., et al., 1996. Constraints on Early Earth Differentiation from Hafnium and Neodymium Isotopes. *Nature*, 379 (6566): 624–627. <https://doi.org/10.1038/379624a0>
- Wang, C.Z., Yang, K.G., Xu, Y., et al., 2009. Geochemistry and LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age of Basic Dike Swarms in North Daba Mountains and Its Tectonic Significance. *Geological Science and Technology Information*, 28 (3): 19–26 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G., 2014. Met Allogeny of the Mesozoic and Paleozoic Volcanic Igneous Event in Ziyang-Langao Areas, North Daba Mountain (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese).
- Wang, K.M., 2014. Study on Petrogenesis, Tectonic Environment and Mineralization of Mafic Rocks in Ziyang-Langao Areas (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese).
- Wang, R.R., Xu, Z.Q., Liang, F.H., 2013. Origin of the Dabashan Salient: Evidence from Numerical Modelling. *Acta Geologica Sinica*, 87 (10): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Wang, R.R., Zhang, Y.Q., Xie, G.A., et al., 2011. Origin of the Dabashan Foreland Salient: Insights from Sandbox Modeling. *Acta Geologica Sinica*, 85 (9): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z.Q., Yan, Q.R., Yan, Z., et al., 2009. New Division of the Main Tectonic Units of the Qinling Orogenic Belt, Central China. *Acta Geologica Sinica*, 83 (11): 1527–1546 (in Chinese with English abstract).
- Weaver, B.L., 1991. The Origin of Ocean Island Basalt End-Member Compositions: Trace Element and Isotopic Constraints. *Earth and Planetary Science Letters*, 104 (2–4): 381–397. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(91\)90217-6](https://doi.org/10.1016/0012-821x(91)90217-6)
- Wood, D. A., 1979. A Variably Veined Suboceanic Upper Mantle—Genetic Significance for Mid-Ocean Ridge Basalts from Geochemical Evidence. *Geology*, 7 (10): 499. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1979\)7<499:avvsum>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1979)7<499:avvsum>2.0.co;2)
- Wood, D. A., Tarney, J., Varet, J., et al., 1979. Geochemistry of Basalts Drilled in the North Atlantic by IPOD Leg 49: Implications for Mantle Heterogeneity. *Earth and Planetary Science Letters*, 42 (1): 77–97. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(79\)90192-4](https://doi.org/10.1016/0012-821x(79)90192-4)
- Woodhead, J. D., Hergt, J. M., Davidson, J. P., et al., 2001.

- Hafnium Isotope Evidence for ‘Conservative’ Element Mobility during Subduction Zone Processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 192(3): 331—346. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(01\)00453-8](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(01)00453-8)
- Wu, F. Y., Jahn, B. M., Wilde, S., et al., 2000. Phanerozoic Crustal Growth: U-Pb and Sr-Nd Isotopic Evidence from the Granites in Northeastern China. *Tectonophysics*, 328 (1—2): 89—113. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(00\)00179-7](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(00)00179-7)
- Wu, F.Y., Li, X.H., Zheng, Y.F., et al., 2007. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185—220 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y.B., Zheng, Y.F., 2004. Genesis of Zircon and Its Constraints on Interpretation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49 (15): 1554—1569. <https://doi.org/10.1007/bf03184122>
- Xia, L. X., Xia, Z. C., Zhang, C., et al., 1994. Petro-Geochemistry of Alkali Mafic-Ultramafic Subvolcanic Complex in Northern Daba Mountains. Geological Publishing House, Beijing, 62—75 (in Chinese).
- Xia, Z.C., Xia, L.X., Zhang, C., 1992. The Study of Pyroxene Minerals of Alkali-Basic-Ultrabasic Subvolcanic Complex from Northern Daba Mountain. *Northwest Geoscience*, 13(2): 32—30 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J.H., Sun, S., Wang, Q.C., et al., 1998. Tectonic Facies Map of China. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Xu, X.Y., Xia, L.X., Xia, Z.C., et al., 2001. Geochemical Characteristics and Petrogenesis of the Early Paleozoic Alkali Lamprophyre Complex from Langao County. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(1): 55—60 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z.Q., Lu, Y.L., Tang, Y.Q., et al., 1998. The Formation of the East Qinling Composite Mountain Chain: Deformation, Evolution and Plate Dynamics. China Environmental Science Press, Beijing (in Chinese).
- Yang, F.C., Sun, J.G., Song, Y.H., et al., 2016. SHRIMP U-Pb Age, Hf Isotope Composition and Geochemical Characteristics of Neoarchean Granitic Complex in Liadong Lianshan Area, NE China. *Earth Science*, 41 (12): 2008—2018 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, B.R., 2001. Magmatic Activities from Plume-Source in the Qinling Orogenic Belt and Its Dynamic Significance. *Earth Science Frontiers*, 8(3): 57—66 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C.L., Gao, S., Yuan, H.L., et al., 2007. Sr-Nd-Pb Isotopes of the Early Paleozoic Mafic-Ultramafic Dykes and Basalts from South Qinling Belt and Their Implications for Mantle Composition. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 32(10): 857—865 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C.L., Gao, S., Zhang, G.W., et al., 2016. Geochemistry of Early Paleozoic Alkali Dyke Swarms in South Qinling and Its Geological Significance. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 32(10): 819—828 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.W., Mei, Z.C., Li, T.H., 1988. Formation and Evolution of the Qinling Orogenic Belt. Northwest University Press, Xi'an, 86—98 (in Chinese).
- Zhang, G.W., Meng, Q.R., Yu, Z.P., et al., 1996. The Orogenic Process of Qinling Orogenic Belt and Its Dynamic Characteristics. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 26 (3): 193—200 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.W., Zhang, B.R., Yuan, X.C., et al., 2010. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics. Science and Technology Press, Beijing, 227—240 (in Chinese).
- Zhang, G.W., Zhang, Z.Q., Dong, Y.P., 1995. Nature of Main Tectono-Lithostratigraphic Units of the Qinling Orogen: Implications for the Tectonic Evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 11(2): 101—104 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.W., Zhou, D.W., Yu, Z.P., et al., 1991. The Feature of Composition, Structure and Evolution of the Qinling Orogenic Belt. In: Ye, L.J., Qian, X.L., Zhang G.W., eds. *Selected Papers of the Qinling Orogenic Belt Symposium*. Northwest University Press, Xi'an, 121—138 (in Chinese).
- Zhang, Y.Q., Shi, W., Li, J.H., et al., 2010. Formation Mechanism of the Dabashan Foreland Arc-Shaped Structural Belt. *Acta Geologica Sinica*, 84 (9): 1300—1315 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, F.F., Sun, F.Y., Liu, J.L., 2017. Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry of the Gneissic Granodiorite in Manite Area from East Kunlun, with Implications for Geodynamic Setting. *Earth Science*, 42 (6): 927—940 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y.F., Zhao, Z.F., Wu, Y.B., et al., 2006. Zircon U-Pb Age, Hf and O Isotope Constraints on Protolith Origin of Ultrahigh-Pressure Eclogite and Gneiss in the Dabie Orogen. *Chemical Geology*, 231 (1—2): 135—158. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.01.005>
- Zhu, J., Cheng, C. H., Wang, L. X., et al., 2016. Some New Knowledge Concerning Silurian Alkaline Magmatism and Related Nb-REE Mineralization in the Zhushan Region, South Qinling. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 36(5): 681—690 (in Chinese with English abstract).

- Zhu, X. Y., Chen, F. K., Nie, H., et al., 2014. Neoproterozoic Tectonic Evolution of South Qinling, China: Evidence from Zircon Ages and Geochemistry of the Yaolinghe Volcanic Rocks. *Precambrian Research*, 245: 115–130. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.02.005>
- Zindler, A., Hart, S., 1986. Chemical Geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14(1): 493–571. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.14.050186.002425>
- Zou, X. W., Duan, Q. F., Tang, C. Y., et al., 2011. SHRIMP Zircon U-Pb Dating and Lithogeochemical Characteristics of Diabase from Zhenping Area in North Daba Mountain. *Geology in China*, 38(2): 282–291 (in Chinese with English abstract).
- 41(1): 55–66.
- 倪世钊,杨德骊,1994.东秦岭东段南带古生代地层和沉积相. 武汉:中国地质大学出版社.
- 王存智,杨坤光,徐扬,等,2009.北大巴基性岩墙群地球化学特征、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其大地构造意义. 地质科技情报, 28(3): 19–26.
- 王刚,2014.北大巴山紫阳—岚皋地区古生代火山岩浆事件与中生代成矿作用(博士学位论文).北京:中国地质大学.
- 王坤明,2014.紫阳—岚皋地区镁铁质岩岩石成因、构造环境及成矿作用研究(博士学位论文).北京:中国地质科学院.
- 王瑞瑞,许志琴,梁凤华,2013.大巴山弧形构造的成因——来自数值模拟的证据.地质学报, 87 (10): 1–9.
- 王瑞瑞,张岳桥,解国爱,等,2011.大巴山前陆弧形构造的成因——来自砂箱实验的认识.地质学报, 85(9): 1–9.
- 王宗起,闫全人,闫臻,等,2009.秦岭造山带主要大地构造单元的新划分.地质学报, 83(11): 1527–1546.
- 吴福元,李献华,郑永飞,等,2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用.岩石学报, 23(2): 185–220.
- 夏林圻,夏祖春,张诚,等,1994.北大巴山碱质基性—超基性潜火山杂岩岩石地球化学.北京:地质出版社, 62–75.
- 夏祖春,夏林圻,张诚,1992.北大巴山碱质基性—超基性潜火山杂岩的辉石矿物研究.西北地质科学, 13 (2): 32–30.
- 许清华,孙枢,王清晨,等,1998.中国大地构造相图.北京:科学出版社.
- 徐学义,夏林圻,夏祖春,等,2001.岚皋早古生代碱性煌斑杂岩地球化学特征及成因探讨.地球学报, 22(1): 55–60.
- 许志琴,卢一伦,汤耀庆,等,1988.东秦岭复合山链的形成.北京:中国环境科学出版社.
- 杨凤超,孙景贵,宋运红,等,2016.辽东连山关地区新太古代花岗杂岩 SHRIMP U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及地质意义.地球科学, 41(12): 2008–2018.
- 张本仁,2001.秦岭地幔柱源岩浆活动及其动力学意义.地学前缘, 8(3): 57–66.
- 张成立,高山,袁洪林,等,2007.南秦岭早古生代地幔性质:来自超镁铁质、镁铁质岩脉及火山岩的 Sr-Nd-Pb 同位素证据.中国科学(D辑):地球科学, 37(7): 857–865.
- 张成立,高山,张国伟,等,2002.南秦岭早古生代碱性岩墙群的地球化学及其地质意义.中国科学(D辑):地球科学, 32(10): 819–828.
- 张国伟,梅志超,李桃红,1988.秦岭造山带的形成及其演化.西安:西北大学出版社, 86–98.
- 张国伟,孟庆任,于在平,等,1996.秦岭造山带的造山过程及其动力学特征.中国科学(D辑):地球科学, 26 (3): 193–200.
- 张国伟,张宗清,董云鹏,1995.秦岭造山带主要构造岩石地

附中文参考文献

- 曹亮,张权绪,胡尚军,等,2015.大巴山南部房县东河辉绿玢岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其构造意义.地质学报, 89(12): 2314–2322.
- 董有浦,沈中延,肖安成,等,2011.南大巴山冲断褶皱带区域构造大剖面的构建和结构分析.岩石学报, 27 (3): 689–698.
- 董云鹏,周鼎武,张国伟,等,1998.秦岭造山带南缘早古生代基性火山岩地球化学特征及其大地构造意义.地球化学, 27(5): 432–441.
- 冯益民,曹宣铎,张二朋,等,2002.西秦岭造山带结构造山过程及动力学——1:100万西秦岭造山带及邻区大地构造说明书.西安:西安地图出版社.
- 何建坤,卢华夏,朱斌,1999.东秦岭造山带南缘北大巴山构造反转及其动力学.地质科学, 34 (2): 139–153.
- 胡健民,孟庆任,白武明,等,2002.南秦岭构造带中—晚古生代伸展构造作用.地质通报, 21 (8—9): 471–477.
- 黄月华,1993.岚皋碱性镁铁—超镁铁质潜火山杂岩中金云角闪辉石岩类地幔捕虏体矿物学特征.岩石学报, 9 (4): 367–378.
- 黄月华,任有祥,夏林圻,等,1992.北大巴山早古生代双模式火成岩套——以高滩辉绿岩和嵩坪粗面岩为例.岩石学报, 8(3): 243–256.
- 吉让寿,秦德余,高长林,1990.古东秦岭洋关闭和华北与扬子两地块拼合.石油实验地质, 12(4): 353–365.
- 李春昱,刘仰文,朱宝清,等,1978.秦岭及祁连山构造发展史.见:国际交流地质学术论文集(1).北京:地质出版社, 174–187.
- 李春昱,王荃,刘雪亚,等,1982.亚洲大地构造图及说明书.北京:地图出版社.
- 李献华,1996.Sm-Nd 模式年龄和等时线年龄的适用性与局限性.地质科学, 31(1): 97–104.
- 刘金龙,孙丰月,张雅静,等,2016.辽宁省清原县南口前岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素.地球科学,

- 层单元的构造性质及其大地构造意义.岩石学报,11(2):101—104.
- 张国伟,周鼎武,于在平,等,1991.秦岭造山带岩石圈组成、结构和演化特征.见:叶连俊,钱祥麟,张国伟,编,秦岭造山带学术讨论会论文选集.西安:西北大学出版社,121—138.
- 张岳桥,施炜,李建华,等,2010.大巴山前陆弧形构造带形成机理分析.地质学报,84(9):1300—1315.
- 赵菲菲,孙丰月,刘金龙,2017.东昆仑马尼特地区片麻状花岗闪长岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其构造背景.地球科学,42(6):927—940.
- 朱江,程昌红,王连训,等,2017.南秦岭竹山地区早古生代碱性岩浆活动及其相关铌稀土成矿的若干认识.岩石矿物学杂志,36(5):681—690.
- 邹先武,段其发,汤朝阳,等,2011.北大巴山镇坪地区辉绿岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年和岩石地球化学特征.中国地质,38(2):282—291.

* * * * *

《地球科学》

2019 年 3 月 第 44 卷 第 3 期 要目预告

- 流体包裹体⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年技术与应用 邱华宁等
 盆地流体年代学研究新技术——激光原位方解石 U-Pb 定年法 刘恩涛等
 四川盆地震旦—寒武系油气成藏的 Re-Os 年代学约束 沈传波等
 高通量试验堆(HFETR)辐照⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年样品条件初探 李军杰等
 四川盆地震旦纪—早寒武世构造—沉积演化过程 梅庆华等
 钓鱼岛隆褶带物质构成及东海西湖凹陷原型盆地东边界再认识 何新建等
 川东多套滑脱层褶皱构造带形成物理模拟 吴航等
 上扬子奥陶纪层序岩相古地理重建及油气勘探启示 邢凤存等
 塔里木盆地盐下地区奥陶系火山碎屑物质特征及其地质学意义 侯明才等