华北克拉通南缘晚中生代花岗质岩浆作用与构造演化

高昕宇, 赵太平*

中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室, 广州 510640

* 通讯作者, E-mail: tpzhao@gig.ac.cn

收稿日期: 2016-12-13; 接受日期: 2017-06-06; 网络发表日期: 2017-07-20

国家重点研发计划项目(编号: 2016YFC0600106)和国家自然科学基金项目(批准号: 41402047、41373046)资助

摘要 华北克拉通南缘在晚中生代158~112Ma发生大规模的花岗质岩浆活动, 以及同时期的钼-金-银-铅-锌多金属矿床成矿作用. 通过分析这些花岗岩类岩石的元素和同位素地球化学特征以及精确的年代学研究成果, 发现它们的地球化学特征在127Ma前后有明显差异: 早期(158~128Ma)主要形成I型花岗岩, 以不具有明显的Eu负异常、富集大离子亲石元素和亏损Y、Yb等重稀土元素为特征; 晚期花岗岩(126~112Ma)更富硅和钾, Eu负异常明显, 具有更高的Y、Yb含量和Rb/Sr比值, 而Sr、 δEu 、Sr/Y比值等明显降低, 主要为A型和高分异I型花岗岩, Sr、Nd、Hf同位素组成相对早期的更亏损, 并伴随少量基性岩浆岩的发育. 两期花岗岩均主要形成于以华北克拉通结晶基底为主的古老地壳物质的部分熔融, 并有幔源岩浆的参与; 由早到晚, 幔源组分显著增多. 这些特征反映了地壳厚度有减薄的趋势, 并在127Ma发生明显的减薄, 证明127Ma是华北克拉通南缘中生代构造体制转折的关键时期; 该时期的构造演化及岩浆作用, 与太平洋板块俯冲引起的幔源岩浆底侵从而引发的强烈壳幔相互作用有关, 并促使岩石圈强烈伸展减薄.

关键词 华北克拉通南缘, 晚中生代, 花岗岩, 物质来源, 构造演化

1 引言

大量地质、地球物理和地球化学资料表明, 华北克拉通的太古宙岩石圈根(>200km)在中-新生代时期被强烈破坏和减薄, 幅度可能大于80~120km(Peng等, 1986; Basu等, 1991; Menzies等, 1993; Fan等, 2000; Kusky等, 2007; Yang等, 2008a; 朱日祥等, 2011). 构造体制从三叠纪时期的挤压环境向晚侏罗世-白垩纪

的伸展环境转变, 发育大量的伸展构造(如变质核杂岩)(Zhang和Zheng, 1999; Davis等, 2002; Liu等, 2005)、断陷盆地(Ritts等, 2001; Ren等, 2002)、大面积的岩浆侵位和火山喷发以及Au-Ag-Mo多金属矿床的大规模成矿(陈衍景等, 1998; Mao等, 2011; Li等, 2012a; Zhai和Santosh, 2013; Goldfarb和Santosh, 2014). 华北克拉通南缘在这一时期也发育了大规模的Mo-Au-Ag-Pb-Zn多金属矿床的成矿作用(Mao等, 2011; Deng等, 2014;

中文引用格式: 高昕宇, 赵太平. 2017. 华北克拉通南缘晚中生代花岗质岩浆作用与构造演化. 中国科学: 地球科学, 47: 1309-1328, doi: [10.1360/N072016-00236](https://doi.org/10.1360/N072016-00236)
英文引用格式: Gao X Y, Zhao T P. 2017. Late Mesozoic magmatism and tectonic evolution in the Southern margin of the North China craton. Science China Earth Sciences, 60: 1959-1975, doi: [10.1007/s11430-016-9069-0](https://doi.org/10.1007/s11430-016-9069-0)

Bao等, 2017)和以花岗岩为主的岩浆侵位事件(Mao等, 2010; Gao等, 2014a, 2014b; Wang X X等, 2015; Bao等, 2017)(图1c).

这一时期的岩浆作用记录了晚中生代华北南缘构造演化及华北克拉通岩石圈减薄的地质过程. 因此, 对它们的时空演化规律、岩石成因和岩浆源区等的相关研究, 能有效反演华北克拉通南缘岩石圈减薄的时空特点和机制, 并为探讨花岗岩与多金属矿床的成因关系提供线索. 正因此, 华北南缘中生代花岗岩的成因研究一直受到众多学者的关注.

近十年来, 对华北克拉通南缘晚中生代的岩浆作用, 尤其是与成矿作用有关的花岗岩的成因和物质源区的研究已经取得长足进展, 很多学者围绕年代学和地球化学等方面进行了大量工作, 积累了丰富的资料(Mao等, 2010; 高昕宇等, 2010, 2012; Ding等, 2011; 王晓霞等, 2011; Li N等, 2012; Zhao等, 2012; Gao等, 2014a, 2014b; Wang X X等, 2015; Bao等, 2017), 但在物质来源、形成的地球动力学背景及与造山带演化之间的关系等方面仍存在争议. 由于华北克拉通南缘大规模钼多金属成矿作用主要发生在晚中生代, 因此晚中生代大规模成岩-成矿事件与秦岭-大别造山带演化过程、扬子与华北克拉通的碰撞拼合及中国东部中生代太平洋板块俯冲引发的构造转折-岩石圈减薄等重要地球动力学过程的关系等, 也是当前备受关注的重要科学问题.

为此, 本文在系统总结华北克拉通南缘晚中生代花岗岩的岩石学、同位素年代学、元素和同位素地球化学等方面资料的基础上, 通过岩浆岩的时空演变和岩石组合特征的研究, 来探讨源区物质来源及其形成的地球动力学机制.

2 地质背景

华北克拉通南缘, 北以三门峡-鲁山断裂带为界与华北克拉通相连, 南以洛南-栾川断裂带为界与秦岭造山带相接, 是华北克拉通的重要组成部分(任纪舜等, 1990). 自晚二叠至早三叠世, 华北和扬子两大板块陆陆碰撞拼合(Wu和Zheng, 2013), 华北克拉通南缘卷入秦岭造山带的构造运动中, 直至晚三叠世(~235Ma)完全闭合, 华北克拉通南缘也成为了秦岭造山带岩石圈的重要组成部分(图1b). 它处于稳定克拉通到活动造

山带的过渡区, 形成与演化同整个秦岭构造带息息相关, 具有秦岭-大别造山带的地质构造演化特征, 但又与华北克拉通地质构造发展密切相关. 华北克拉通南缘地壳物质组成的突出特点是与华北克拉通一样具有结晶基底和盖层的双层结构; 区域性构造以近东西向为主, 叠加北东-北北东向构造.

华北克拉通南缘结晶基底由古元古代-新太古代(2.84~2.26Ga)太华群组成. 太华群是以斜长角闪岩、TTG片麻岩、混合岩和变质表壳岩为主的一套中高级区域变质岩, 其变质程度普遍达角闪岩相, 局部达麻粒岩相(Kröner等, 1988; Wan等, 2006; Xu X S等, 2009; Huang等, 2010, 2012). 不整合覆盖在太华群之上的沉积盖层是古元古代熊耳群火山岩(1.80~1.75Ga)(Zhao T P等, 2004). 熊耳群火山岩在区内分布面积大于60000km², 局部厚度可达7600m, 岩性以高钾富铁的中基性-中酸性熔岩为主, 局部发育火山碎屑岩层和沉积岩夹层(<5%)(Zhao T P等, 2004). 盖层岩系除熊耳群火山岩外, 还包括中元古代官道口群和汝阳群滨海相陆源碎屑岩-碳酸盐岩建造、新元古代栾川群和洛峪群浅海相碎屑岩-碳酸盐岩和碱性火山岩建造, 以及零星出露的震旦系、寒武系、白垩系和大面积的新生代地层.

中生代时期华北克拉通南缘岩浆作用集中在二叠纪和晚侏罗至早白垩世. 其中二叠纪岩浆岩主要岩性为石英二长岩、石英闪长岩、二长花岗岩和正长花岗岩, 呈岩脉或岩株状产出, 仅在华北克拉通南缘的西部小秦岭和熊耳山地区有少量发育, 如小秦岭老牛山杂岩体中的二叠纪侵入体(228~214Ma, Ding等, 2011; 齐秋菊等, 2012)、瓮峪花岗岩(205Ma, Hu等, 2012)和熊耳山寨凹花岗岩脉(217.7Ma, 李厚民等, 2012). 晚侏罗至早白垩世花岗岩在华北克拉通南缘广泛发育(图1c和2), 以地表出露面积广大、多期次侵入的复式花岗岩基为主, 岩性多为斑状、似斑状黑云二长花岗岩和黑云母花岗岩、正长花岗岩, 侵位时间持续数百万年到数十个百万年. 与此同时, 也发育大量的与成矿作用有关花岗斑岩体, 斑岩体规模小, 出露面积小于1km², 其侵位与定位主要受断裂控制, 岩体直接产于断裂带中, 沿断裂带成群成带分布.

华北克拉通南缘也是我国著名的成矿带, 发育大规模的Mo-Au-Ag-Pb-Zn多金属成矿作用, 在空间上矿床多沿构造-岩浆带展布, 与深大断裂带方向大体一致,

图1 华北克拉通南缘晚中生代花岗岩和矿产分布图

(a) 中国地质简图; (b) 秦岭造山带大地构造简图(图b据张国伟等(1996), 有修改); (c) 华北克拉通南缘晚中生代花岗岩和矿产分布图(岩体编号同网络版附表1~4, <http://earthcn.scichina.com>)

走向EW-NWW, 控矿断裂以NW向的张性断裂系统为主(图1c), 自西向东依次分为小秦岭金(钼)矿集区、崤山金(银)矿集区、熊耳山钼、金、银-铅-锌矿集区及外方山钼、铅-锌矿集区(图1c), 发育大规模斑岩型钼矿, 爆破角砾岩型、构造蚀变岩型和石英脉型金矿, 热液脉状银铅锌矿床。本区成矿作用主要集中于中生

代时期, 其中早中生代识别出的成矿事件较少, 典型的有小秦岭地区大湖石英脉型钼-金矿床(218~232Ma, 李厚民等, 2007; 李诺等, 2008)和黄龙铺碳酸盐脉型钼矿床(216~222Ma, 黄典豪等, 2009; 许成等, 2009)等。晚中生代主要成矿期与大规模的岩浆作用近同期, 集中于晚侏罗到早白垩世, 且多与同期花岗岩, 尤其是

图2 华北克拉通南缘晚中生代岩浆岩锆石U-Pb年龄分布图

数据来源同网络版附表1

小斑岩体相伴生产出,二者有密切的成因关系(Mao等, 2008; Deng等, 2014; Bao等, 2017)。

3 年代学格架

近十年来,国内外学者对华北克拉通南缘晚中生代花岗岩做过大量高精度的同位素年代学工作,作者将这些年龄数据总结于网络版附表1中。

年代学结果表明,晚中生代岩浆活动形成于158~112Ma,岩浆作用持续近50Ma,在约128~126Ma存在短暂的间歇期(图2,网络版附表1)。近年来也识别出零星分布的与花岗岩和多金属矿床同期的中基性岩岩,其锆石U-Pb年龄为148~117Ma,主要集中在129~117Ma(谢桂青等, 2007; 包志伟等, 2009; 赵海杰等, 2010b; Gao等, 2014a)。

根据岩浆作用规模,花岗岩的形成时间可分为两个阶段,早期阶段为晚侏罗-早白垩世(158~128Ma),代表了这一大规模岩浆活动的主体阶段,有14个大型多期侵位形成的复式花岗岩基和32个小岩体组成,在小秦岭、崮山、熊耳山、外方山和伏牛山地区均有出露(图1c,网络版附表1)。

多期次侵入体构成的复式花岗岩基自西向东有小秦岭地区的蓝田(154~133Ma)、老牛山(152~145Ma)、华山(143~132Ma)、文峪(138~131Ma)和娘娘山岩体(142~133Ma),熊耳山地区的花山(132Ma)、蒿坪(130~129Ma)、五丈山岩体(156Ma),外方山地区的合峪(148~134Ma)、太山庙(126~113Ma)、石宝沟岩体(157~145Ma)以及伏牛山地区的黄山(133Ma)、祖师

顶(132Ma)和张士英岩体(124~104Ma)等(网络版附表1)。这些岩体的形态呈不规则状,无变形变质特征,主要岩石类型为似斑状、含斑或无斑二长花岗岩和正长花岗岩,主要矿物组成为钾长石、斜长石、石英、黑云母、角闪石等,副矿物为磁铁矿、榍石、磷灰石和锆石等。已有的年龄数据显示,复式花岗岩基的侵位时间多持续数个百万年到数十个百万年,且随时间由早到晚,不同期次侵入体的岩石结构构造和岩石类型呈有规律的变化,如斑晶逐渐变小直至消失,粗粒逐渐向中细粒演化等。较典型的岩基如外方山地区的合峪花岗岩基形成时间持续14Ma,随着形成时间由老到新,各期次侵入体主要岩石类型由大斑状中粗粒黑云母二长花岗岩逐渐向无斑细粒黑云母二长花岗岩和细粒正长花岗岩演变,斑晶和基质粒度均明显减小,钾长石含量逐渐增加,由二长花岗岩向正长花岗岩演化。

小岩体多为花岗斑岩或钾长花岗斑岩,如金堆城、黄龙铺、夜长坪、雷门沟和南泥湖等,出露面积均小于1km²,岩体具有典型的斑状结构,侵位与定位主要受断裂控制,甚至岩体直接产于断裂带中。这些斑岩体多与区域矿化,尤其是Mo矿化有成因关系,钼矿化发育在岩体内部、接触带或围岩中。

基性岩浆作用在这一阶段极少发育,目前仅在小秦岭地区黄龙铺岩体和栾川地区西沟铅锌矿区发现有限几条辉绿岩和辉长岩脉,分别形成于129和148Ma(包志伟等, 2009; 赵海杰等, 2010b)。

晚期阶段的岩浆作用集中在早白垩世晚期(126~112Ma),规模较早期小,由太山庙、伏牛山和角子山三个复式岩基以及东沟、张士英和尚古寺三个小斑岩体组成,分布于华北南缘东部的外方山和伏牛山地区,岩性主要为正长花岗岩、二长花岗岩和石英正长岩等(图1c,网络版附表1)。

这一时期中基性岩浆作用规模较早期大,包括外方山地区天桥沟闪长岩(122Ma)(Gao等, 2014a)、宝丰盆地大营组基性火山岩(117Ma)(谢桂青等, 2007)和侵入于伏牛山花岗岩基中的煌斑岩墙(116Ma)(高昕宇, 2012)。华北克拉通南缘晚中生代岩浆作用的年龄数据反应出整个区域的岩浆作用时间总体上表现出由西向东逐渐年轻的特征。

华北克拉通南缘晚中生代的构造活动及广泛发育的花岗质岩体对成矿作用也产生了重要影响。在空

间上,多金属矿床与岩体紧密的分布在同期侵入岩附近.近年来对成矿年代学研究表明,研究区内晚中生代钼-金成矿作用均集中于157~115Ma(王义天等, 2001; Wang等, 2002; Mao等, 2008; 焦建刚等, 2009; 李诺等, 2009; 姚军明等, 2009; 高亚龙等, 2010; 黄凡等, 2010; 刘军等, 2011; Li N等, 2012; Li等, 2012a, 2012b; Tang K F等, 2013; Deng等, 2014; 唐克非, 2014),显示出华北南缘晚中生代成矿大爆发和岩浆作用广泛发育在时间和空间上均高度吻合.

除华北克拉通南缘外,这一时期的岩浆作用在整个中国东部均有广泛分布.在邻区的大别-苏鲁造山带发育大量晚侏罗-早白垩世岩浆岩,同位素年龄集中在111~161Ma(Xue等, 1997; Hacker等, 1998; Zhao Z F等, 2004; Yang等, 2005; Wu等, 2005; Xie等, 2006; Wang等, 2007; Xu等, 2007; Zhao D P等, 2007).其中晚侏罗世的花岗岩出露较少,主要位于苏鲁造山带东部,岩性为花岗闪长岩、二长花岗岩和含石榴子石淡色花岗岩,锆石U-Pb年龄为142~161Ma(胡芳芳等, 2004; 郭敬辉等, 2005).大别-苏鲁造山带出露面积最广的是早白垩世花岗岩,同位素年龄集中于111~143Ma,峰期在125~130Ma(赵子福和郑永飞, 2009);从侵位时间上也可分为早晚两期,早期岩浆岩侵位时间在130Ma以前,存在不同程度的构造变形(马昌前等, 2003; Wang等, 2007; Xu等, 2007),晚期岩浆岩侵位时间在130~111Ma,以缺乏构造变形为特征(Jahn等, 1999; Zhao Z F等, 2004; Xie等, 2006; Xu等, 2007; Zhao Z F等, 2007).

辽东半岛进入中生代后也发生了强烈的岩浆活动,区内分布有约30000km²的中生代花岗岩,岩石类型多样,几乎包括了所有类型的侵入岩,组成规模不等的岩体.辽东半岛中生代花岗质岩浆作用可划分为三个阶段:三叠纪(233~212Ma)、侏罗纪(180~156Ma)和早白垩世(131~113Ma);三叠纪花岗岩出露较少,主要以侏罗纪和早白垩世花岗质岩石为主(吴福元等, 2005; Yang等, 2008b).侏罗纪时期辽东半岛的岩浆活动主要以花岗岩为主,缺少基性侵入岩(吴福元等, 2007; Xu Y G等, 2009).早白垩世花岗岩(131~113Ma)的岩石类型复杂,不仅发育有大面积的I型花岗岩,还出露大量A型花岗岩及碱性岩和基性岩脉,且以A型花岗岩占主体,并伴随大规模金矿床产出(Yang等, 2006, 2008b).

上述资料表明,华北克拉通南缘晚侏罗到早白垩世花岗质岩浆活动两个阶段的年龄和苏鲁-大别地区

及辽东半岛同期花岗岩的形成时代基本一致,这一时期的地质事件在华北克拉通东部乃至中国东部不同地区均有相同的地质响应.

4 地球化学特征

4.1 元素地球化学

华北克拉通南缘晚中生代花岗岩具有较大的成分变化范围(图3~7),碱含量较高,在K₂O-SiO₂图解上主要分布在高钾钙碱性和钾玄岩系列区域内(图3),为准铝质到过铝质(图4).稀土模式表现出明显的轻稀土富集(图6a和b).在Harker图解上,所有样品均与SiO₂呈连续负相关演化趋势(图5a~f),表明这些花岗岩是由地球化学组成不均一的源区物质部分熔融所形成.

区域内晚中生代花岗质岩浆活动从地球化学特征上,早晚两期岩浆作用有明显区别:

图3 华北克拉通南缘晚中生代花岗岩K₂O-SiO₂图

分界线据: Peccerillo和Taylor(1976)、Middlemost(1985);数据来源: 叶会寿等(2008)、周红升等(2008)、周珂(2008)、朱赖民等(2008)、包志伟等(2009)、戴宝章等(2009)、郭波等(2009)、焦建刚等(2009)、倪智勇(2009)、向君峰(2009)、许道学(2009)、姚军明等(2009)、高昕宇等(2010, 2012)、李创举和包志伟(2010)、赵海杰等(2010a, 2010b)、王晓霞等(2011)、Hu等(2012)、Yang(2012)、Zhao等(2012)、齐秋菊等(2012)、肖娥等(2012)、肖鸿等(2012)、Yang等(2013)、Zhu等(2013)、柯昌辉等(2013)、李磊等(2013)、李铁刚等(2013)、Bao等(2014)、Gao等(2014a, 2014b)、Yang Z F等(2014)、李正远等(2014)、卢仁等(2014)、齐玥(2014)、Wang C M等(2015)、段友强等(2015)、赖相濡(2015)、梁涛和卢仁(2015)、张灯堂等(2015)、张兴康等(2015)、王赛等(2016)

图4 华北克拉通南缘晚中生代花岗岩A/NK-A/CNK图
分界线据: Maniar和Piccoli(1989); 数据来源同图3

早期阶段(158~128Ma)岩体 $\text{SiO}_2=60.84\sim79.13\%$, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=4.35\sim10.5\%$ (图3). 稀土元素分馏较大, 轻稀土富集, 重稀土亏损, 配分曲线呈明显右倾型, 具有弱Eu负异常或不具有Eu负异常($\delta\text{Eu}=0.66\sim1.49$)(图6a), 富集大离子亲石元素(K、Rb、Sr、Ba), Y和Yb等重稀土元素含量较低(图7a~f).

晚期阶段(126~112Ma)岩体较早期岩体有更高的 SiO_2 和碱含量($\text{SiO}_2=64.45\sim80.78\%$, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=7.05\sim14.36\%$)(图3), 更低的A/NK和A/CNK值(图4), 表现出强烈富硅、富钾的特征, 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解上主要分布于钾玄岩系列(图3). 轻稀土较富集, 重稀土弱亏损, Eu负异常明显($0.09\sim0.77$)(图6b), Sr和Ba元素含量相对较低. 如图7所示, 元素含量或比值在~127Ma前后, 或突然升高或突然降低, 发生了非常明显且迅速的变化, 晚期岩体具有更高的Y、Yb含量和Rb/Sr比值, 而Sr、 δEu 、Sr/Y比值均显示出明显降低.

4.2 同位素地球化学

为示踪华北克拉通南缘早白垩世花岗岩的源区特征, 本文统计了华北克拉通南缘晚中生代花岗岩的Sr、Nd、Hf、Pb同位素组成(网络版附表2, 图8~10). 华北克拉通南缘各地区中生代花岗岩具有相似的初始($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i比值, 介于0.7050~0.7236, 具有中等的初始Sr同位素比值. 它们具有较低的放射成因Pb同位素组成, 其中($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i为15.659~18.720, ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i为15.344~15.656, ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i为36.110~38.707(网络版附表3). 岩体普遍具有较低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和老

的 t_{DM2} 年龄值: $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值介于-7.5~-22.1, t_{DM2} 变化范围为1.55~2.74Ga; $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于-1.9~-35.7, Hf二阶段模式年龄变化范围为1.29~3.38Ga. 这些数据表明, 这些花岗岩的源岩应主要为古老陆壳物质. 岩体的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 以及两阶段模式年龄均显示出较大的变化范围, 说明华北克拉通南缘晚中生代花岗岩的岩浆源岩组成复杂. 而且, 随岩体年龄由老到新, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均表现出增大的趋势, 二阶段模式年龄由老到新变化(图8和9), 早期岩体 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=-7.6\sim-22.1$, Nd同位素二阶段模式年龄 $t_{\text{DM2}}=1.55\sim2.74\text{Ga}$, 晚期岩体 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=-7.5\sim-17.3$, $T_{\text{DM2}}=1.53\sim2.31\text{Ga}$. Hf同位素组成则更加明显地反映了这一趋势, 早期岩体 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-3.4\sim-35.1$, $T_{\text{DM2}}=1.46\sim3.38\text{Ga}$, 晚期岩体 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-1.9\sim-20.8$, $T_{\text{DM2}}=1.29\sim2.49\text{Ga}$. 这种同位素组成的变化, 反映晚期阶段岩浆源区有更多同位素组成相对亏损的源岩物质加入.

5 物质来源

华北克拉通晚中生代花岗岩与成矿作用的成因关系密切(Mao等, 2008; 朱赖民等, 2009; Chen和Wang, 2011; Li等, 2012a; Deng等, 2014). 岩浆源区的研究, 可以为成矿物质源区的研究提供重要线索, 因此花岗岩源岩组成的问题也是区域研究重点之一. 尽管华北克拉通南缘晚中生代花岗岩具有较大的地球化学成分变化范围和不同岩石类型, 但它们具有较为类似的Sr、Nd、Hf同位素组成(网络版附表2), 反应源区均以古老的壳源物质为主. 大部分学者认为, 这些花岗岩为华北克拉通南缘古老地壳(如熊耳群和太华群)部分熔融形成, 并有新生岩石圈地幔及软流圈地幔物质的加入(Hu等, 2012; Li N等, 2012; Gao等, 2014a, 2014b; Wang X X等, 2015). 还有一些观点认为, 花岗岩年轻同位素模式年龄代表其源区主要来自于俯冲到华北克拉通下部的扬子北缘的地壳物质(李磊等, 2013; Bao等, 2014, 2017).

华北南缘晚中生代花岗岩总体上与太华群斜长角闪岩和熊耳群火山岩的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值($t=130\text{Ma}$)范围相似(图10)(Peng等, 2008; Xu X S等, 2009; He等, 2010; Wang等, 2010; Ni等, 2012), 但明显小于太华群片麻岩和石英片岩(黄萱和吴利仁, 1990). 岩体的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值与太华群斜长角闪岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t=130)$ 值相似, 尤其是早期阶段岩

图5 华北克拉通南缘晚中生代花岗岩主要元素地球化学特征

数据来源同图3

体的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值部分落入太华群斜长角闪岩范围内,但明显高于太华群片麻岩和石英片岩和熊耳群火山岩的Nd同位素组成(图10). 太华群角闪岩和麻粒岩相变质岩的原岩形成于新太古代到古元古代(2.84~2.26Ga),并于2.1~1.8Ga发生强烈变形变质作用(Kröner等, 1988; Wan等, 2006; Xu X S等, 2009),其同位素模式年龄为2.8~3.2Ga. 而主要盖层岩系熊耳群,形成于

1.75~1.80Ga(Zhao T P等, 2004). 可见,华北克拉通的主要年龄记录与晚中生代花岗岩的同位素二阶段模式年龄($T_{\text{DM(Nd)2}}=1.55\sim2.74\text{Ga}$; $T_{\text{DM(Hf)2}}=1.29\sim3.38\text{Ga}$)相似,其中早期阶段花岗岩有近一半样品落入太华群Hf同位素演化线内(图9). 这些同位素组成特征表明,华北克拉通南缘结晶基底可能是花岗岩的重要物源. 此外,花岗岩的二阶段模式年龄下限小于太华群的形成

图6 华北克拉通南缘晚中生代花岗岩稀土元素配分模式图

球粒陨石标准化值据Sun和McDonough(1989); 数据来源同图3

年龄, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值也明显高于太华群和熊耳群地壳演化线在晚中生代的变化范围, 尤其是晚期阶段花岗岩的Hf同位素组成几乎都落入太华群Hf同位素演化线以上(图9), 表明只有结晶基底太华群变质岩部分熔融不能形成符合全部华北南缘晚中生代花岗岩同位素特征的熔体。

近年来, 对华北克拉通基底岩石高质量的锆石U-Pb定年结果证明, 其最重要的年龄组是2.4~2.5Ga, 其比例远远高于其他年龄组, 同时还有1.7~1.9Ga和2.0~2.2Ga的年龄存在(Zhao等, 2001; Gao等, 2004; Xu等, 2006)。继承锆石是示踪岩浆源区性质的有效指示剂(Keay等, 1999)。锆石U-Pb年龄分析发现, 华北南缘晚中生代花岗岩中的继承锆石年龄范围跨度很大, 分布于3052~447Ma, 但主要由新太古代至古元古代(约2.7~1.7Ga)年龄组成(图11; 网络版附表4), 集中在太华群强烈演化的地质历史阶段, 表明晚中生代花岗岩与太华群具有密切的物源联系。

与华北克拉通南缘的地壳生长历史不同的是, 扬子克拉通北缘地壳主要增生时间是在中元古-新元古代(张少兵等, 2007; Ling等, 2008; Wang等, 2013)、早古生代、晚三叠世也是重要的地壳生长阶段(Yang等, 2007)。这个年龄无论与华北南缘晚中生代花岗岩的Hf同位素二阶段模式年龄(1.29~3.38Ga)还是主要继承锆石年龄范围(2.7~1.7Ga)均不能很好的对应, 表明扬子克拉通北缘是花岗岩物源的可能性较小。此外, 本文收集了源于俯冲的扬子克拉通大陆岩石圈北缘物质的大别晚中生代花岗岩类的Pb同位素组成与华北南缘晚中生代花岗岩进行对比。在图12中, 二者仅有小部分重叠, 总体上也表现出不同的同位素组成特征。

综上所述, 华北南缘晚中生代花岗岩的主要源区物质仍应该是以华北克拉通结晶基底为主, 并有更加亏损的同位素组成物质的加入。

目前很多研究认为幔源岩浆在华北南缘晚中生代岩浆-成矿作用中起了重要作用, 不仅提供热源, 还在成岩-成矿过程中直接提供物源。Han等(2013)通过对不同时期岩体中锆石 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 比值变化规律, 认为从老到新, 花岗质岩浆成岩成矿作用过程中地幔物质的加入逐渐增多, 并对Mo、Au元素的成矿作用起了关键作用。朱赖民等(2009)通过对钼矿成矿流体稳定同位素和Pb同位素组成以及成矿斑岩体和区域地层岩石含矿性的研究揭示了, 矿床成岩成矿物质来自深部, 为下地壳和上地幔混合源。目前在华北南缘发现的晚中生代基性岩浆岩有栾川西沟矿区发现的辉长岩脉((148±2)Ma)、黄龙铺辉绿岩脉((129±2)Ma)、天桥沟闪长岩((122±2)Ma)、大营组安山岩((117±2)Ma)和伏牛山煌斑岩墙((117±2)Ma)(数据来源见网络版附表1)。它们的形成年龄与花岗岩的岩浆作用历史相对应, 是华北南缘在晚中生代的大规模岩浆作用中壳幔作用的直接证据。在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t - \varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解上(图10), 花岗岩同位素数据主要落于太华群斜长角闪岩和地幔物质混合线上, 也表明岩体均经历了不同程度的壳幔混合作用。此外, 岩体的Nd和Hf同位素组成表现出随着年龄由老到新, 逐渐向亏损的方向演化, 模式年龄更加年轻的趋势。尤其岩体的Hf同位素组成在127Ma前后发生显著变化, 晚期阶段岩体的二阶段模式年龄明显年轻, 这一时期的基性岩浆作用规模也较早期增大, 表明晚期阶段岩体中地幔作用较早期阶段显著增强(图8和9)。因此可以认为在整个晚中生代岩浆作用

图7 华北克拉通南缘晚中生代花岗岩微量元素地球化学特征

数据来源同图3

过程中,地幔物质在岩浆形成中不仅提供了热源,也提供了物源,华北克拉通南缘地壳深部在晚中生代时期经历了壳幔相互作用,且随岩浆作用和构造运动的演化,地幔物质的作用更加强烈。

6 地球动力学机制

如前所述,华北克拉通南缘晚中生代花岗岩的元素地球化学和同位素组成特征,在约127Ma前后发生

了明显的改变(图6~9),除了指示其源区特征的变化外,也表明区域构造环境发生了强烈的变化。

地球化学数据表明早期阶段(158~128Ma)的花岗岩一般为典型的I型花岗岩,而晚期阶段(127~112Ma)的花岗岩的地球化学特征则发生了明显的变化,如Sr、Eu的负异常,相对早期阶段的具有更高的高场强元素和重稀土元素含量,更为富硅、富钾(图3~7)。多数岩体具有较强分异演化的特征,均属于A型花岗岩

图8 华北克拉通南缘晚中生代花岗岩的Nd同位素组成

数据来源同网络版附表3

图9 华北克拉通南缘晚中生代岩浆岩的Hf同位素组成

数据来源: 戴宝章等(2009)、郭波等(2009)、姚军明等(2009)、高昕宇等(2010, 2012)、赵海杰等(2010a)、王晓霞等(2011)、Hu等(2012)、Li H Y等(2012)、Li N等(2012)、Zhao等(2012)、齐秋菊等(2012)、肖娥等(2012)、杨阳等(2012)、Yang等(2013)、曾令君等(2013)、程知言等(2013)、柯昌辉等(2013)、Bao等(2014, 2017)、Gao等(2014a, 2014b)、Wang X X等(2015, 2015)、段友强等(2015)、张兴康等(2015)、王赛等(2016)

或高分异I型花岗岩,反映了自127Ma开始,华北克拉通南缘岩石圈开始进入强烈伸展减薄的构造环境(叶会寿等, 2006; 戴宝章等, 2009; 李创举和包志伟, 2010; Yang等, 2013; Gao等, 2014a, 2014b)(图13).

岩石圈减薄可以使地壳岩石因减压而熔融(Sylvester, 1998), 然而没有深部地幔物质或热源的供给, 单纯的地壳减压熔融只能形成小规模岩体, 缺少足够的热量不可能形成大规模的岩浆活动(Roberts和Clemens, 1993), 应有外来热源的加入才能使岩浆源

图10 华南北缘晚中生代岩浆岩Sr-Nd同位素组成

图中太华群和熊耳群 $\epsilon_{Nd}(t)$ 和 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t$ 使 $t=120$ 计算得到; 太华群斜长角闪岩: 黄萱和吴利仁(1990)、Ni等(2012); 太华群片麻岩和石英片岩: 黄萱和吴利仁(1990); 熊耳群火山岩: He等(2010)、Peng等(2008)、Wang等(2010); 幔源岩浆(B): Jahn等(1999); 亏损地幔(DM)和地幔演化线: Hart和Zindler(1986); OIB和MORB: Sun和McDonough(1989); 其他数据来源同网络版附表4

区大规模熔融(Miller等, 2003). 地幔与地壳之间的热传递被认为是地壳熔融的主要方式, 而最有效的方式是通过幔源岩浆底侵作用将地幔热传递到地壳引发熔融(Xu Y G等, 2009). 地球物理资料显示, 华北克拉通南缘下部存在着明显的地幔隆起, 呈北西走向, 大致与中生代岩浆岩和钼、金多金属成矿带及区域深大断裂在地表的展布范围吻合, 推测为地幔上涌的残留, 反映地幔上涌和岩浆-成矿作用存在密切联系(袁学诚, 1996). 对早期阶段(158~128Ma)花岗岩的物质来源研究表明源区有幔源岩浆的加入, 且有少量基性岩

图 11 华北克拉通南缘晚中生代花岗岩继承锆石 U-Pb 年龄统计图

数据来源同网络版附表4

脉发育. 栾川地区西沟铅锌矿区发现的辉长岩脉形成于 $(147.5 \pm 1.7)\text{Ma}$ (包志伟等, 2009); 小秦岭黄龙铺地区出露的辉绿岩形成于 129Ma , 且其元素和同位素地球化学数据表现出来源于富集地幔的特征(赵海杰等, 2010b). 基性岩浆作用的发育表明这一时期, 在华北克拉通南缘, 软流圈上涌持续加热岩石圈底部形成的幔源玄武质岩浆底侵使中下地壳熔融, 大量的长英质岩浆沿断裂带上侵并形成花岗岩, 在这一过程中地幔物质除了提供热源外, 还提供了物源(图13b).

晚期花岗岩的同位素组成更加亏损, 表明这个阶

段岩体源区中幔源物质显著增加, 壳幔作用和基性岩浆作用更加强烈(图13c). 王团华等(2008a)对小秦岭-熊耳山金矿区的辉绿岩墙和煌斑岩墙样品进行SHRIMP锆石U-Pb测年, 得到 127Ma 和 128Ma 两个测点的晚中生代年龄数据. 其全岩地球化学特征显示, 这些岩墙具Nb、Ta、Ti亏损和Sr-Nd同位素富集的岛弧岩浆岩特征, 岩浆可能来自于受到富钾熔体交代的上地幔的部分熔融, 岩浆演化过程中明显受到壳源物质混染和强烈的结晶分异作用(王团华等, 2008b, 2008c); 平顶山早白垩世大营组的中基性火山岩(117Ma , 谢桂青等, 2007)也具有富集的同位素组成, 被认为形成于华北古老陆下岩石圈地幔和深俯冲的扬子下地壳混合源区的部分熔融作用(李晓勇等, 2006)或早期俯冲组分改造的富集地幔(谢桂青等, 2007); 高昕宇(2012)报道了在伏牛山花岗岩基中产出的数条宽度不等的煌斑岩墙(117Ma), 样品的微量元素组成不具有Nb、Ta、Ti等高场强元素负异常, 且具有相对亏损的Sr-Nd-Hf同位素组成, 显示出板内洋岛玄武岩的特征, 来源于亏损地幔和富集地幔的混合, 软流圈地幔的贡献表明此时岩石圈已经强烈伸展减薄, 煌斑岩作为岩墙侵位也是中上部地壳伸展作用的明确标志(邵济安等, 2003). 与此同时, 在华北克拉通南缘西部的小秦岭地区发育变质核杂岩构造. Zhang和Zheng(1999)结合野外切割关系和构造测年, 限定了拆离断层的发育时限为 $135\sim 123\text{Ma}$,

图 12 华北克拉通南缘晚中生代花岗岩与大别造山带中生代花岗岩Pb同位素对比

大别造山带花岗岩数据来自: Zhang等(2002)、Wang等(2005)、Hou等(2007)、Huang等(2007, 2008)、胡芳芳等(2007)、Liu等(2008, 2009)、He等(2013)

图 13 华北克拉通南缘晚中生代岩浆-构造演化模式图
修改自Gao等(2014b)

而变质核杂岩内部垮塌伸展发育的时限为120~106Ma, 主要发生于116Ma. 这些基性-超基性岩和变质核杂岩构造体系的发育都是指示岩石圈伸展减薄最直接的地质证据.

综上所述, 华北克拉通南缘晚中生代的岩浆作用从发育典型的I型花岗岩到发育A型花岗岩和高分异花岗岩, 并伴随中基性岩浆的侵位, 这种岩石成因类型和形成机制的演变表明岩石圈向强烈伸展减薄的构造环境的转变. 年代学格架的研究表明, 127Ma是

华北南缘晚中生代构造体制转变的一个关键时期.

值得注意的是, 华北克拉通南缘晚中生代岩浆作用时限158~112Ma, 距扬子克拉通与华北克拉通完成碰撞拼合和相应超高压变质作用的时间(245~235Ma)间隔已达约100Ma(张国伟等, 1996), 而对于一个碰撞造山旋回, 从碰撞到伸展减薄及后碰撞岩浆活动, 一般应在50Ma之内(Van Staal和De Roo, 1995; Finger等, 1997; Liégeois等, 1998; Waight等, 1998; Bea等, 1999; Van Wagoner等, 2002). 晚中生代的大面积岩浆侵位、

火山喷发、Au-Ag-Mo多金属矿床的大规模成矿和伸展构造,在胶东半岛、太行山脉、鲁西、辽东和大别地区也均有发育(Zhang, 2012; Guo等, 2013; Tang Y J等, 2013; Zhai和Santosh, 2013; Zhang等, 2013; Goldfarb和Santosh, 2014; Yang Q Y等, 2014),表明这一地质事件并不独立存在于华北克拉通南缘,而是在华北克拉通东部乃至中国东部不同地区均有相同的地质响应,受控于统一的动力学背景.前人研究认为,这一时期中国东部发生的挤压-伸展构造、构造再活化、岩石圈减薄和克拉通破坏与古太平洋板块漂移方向的大幅度转折和俯冲速率的逐渐增强有密切的时空耦合关系(Bartolini和Larson, 2001; 孙卫东等, 2008).因此,越来越多的研究认为华北克拉通的岩石圈伸展减薄与古太平洋板块俯冲引起的亚洲大陆东部岩石圈之下软流圈地幔的对流方向和速率的变化有关(Zhao等, 2007; Zhu等, 2010, 2012; 朱日祥等, 2011; Guo等, 2013; Tang Y J等, 2013; Goldfarb和Santosh, 2014)(图14).

古太平洋板块的平板俯冲对亚洲大陆的影响一直延伸至近1300km的内陆,从而引起了包括华北克拉通在内的整个中国东部晚中生代的大规模岩浆作用(Li和Li, 2007).这种俯冲效应对中国东部岩石圈的影响向西可能只达华北克拉通的东部.目前华北克拉通南缘所在的秦岭造山带东部地区发育巨量晚中生代花岗岩和多金属矿床,而其西部没有,就是一个很好的证据.受古太平洋板块俯冲的影响,软流圈地幔受到扰动而上涌加热,促使岩石圈减薄,特别是沿华北

克拉通周缘的深大断裂最为强烈,如华北克拉通南缘的洛南-栾川断裂(Tian和Zhao, 2011; Yang W等, 2012; Cai等, 2013; Ma等, 2014)(图14).在华北克拉通南缘,太平洋板块长距离俯冲对内陆的影响,向西一直延续至小秦岭地区(Li等, 2012a).

7 结语

华北克拉通南缘晚中生代岩浆-成矿事件频发,尤其是花岗岩出露遍布整个区域,记录着该区岩石圈性质和构造演化的重要信息.精确的年代学和地球化学研究结果显示,花岗质岩浆作用持续近50Ma,经历了2个阶段的演化.早期阶段的花岗岩(158~128Ma)为I型花岗岩,源岩以华北克拉通南缘古老结晶基底物质为主,并有幔源物质的参与.晚期阶段的为126~112Ma,具有较强分异演化的特征,均属于A型花岗岩或高分异I型花岗岩,形成于强烈伸展减薄的构造环境,且花岗岩源区中的地幔物质显著增多,并伴随有同期基性岩浆岩的产出,表现出强烈的壳幔相互作用.华北克拉通南缘晚中生代岩浆作用由早到晚的演化趋势,揭示了区域构造体制由加厚的岩石圈向强烈伸展减薄的构造环境的转变,而127Ma前后是华北南缘晚中生代构造体制转变的一个关键时期.华北克拉通南缘晚中生代强烈的岩浆-成矿-构造热事件并不是扬子与华北克拉通碰撞后的产物,而是与古太平洋板块在亚洲大陆东部之下俯冲方向和速率的改变引发的整个中国东部构造转折-岩石圈伸展减薄有关.

图14 华北克拉通晚中生代构造演化的地球动力学机制

修改自Li等(2012a)和Gao等(2014a); NCC=North China Craton

致谢 华北克拉通南缘中生代花岗岩的研究过程中赵振华研究员、包志伟研究员、姚军明研究员和王世炎教授级高工给予了帮助和学术指导, 匿名审稿人对本文提出的建设性的修改建议, 在此一并表示感谢。

参考文献

- 包志伟, 李创举, 祁进平. 2009. 东秦岭栾川铅锌银矿田辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及成矿时代. 岩石学报, 25: 2951–2956
- 陈衍景, 郭光军, 李欣. 1998. 华北克拉通花岗绿岩地体中生代金矿床的成矿地球动力学背景. 中国科学D辑: 地球科学, 28: 35–40
- 程知言, 胡建, 蒋少涌, 张遵忠, 戴宝章, 肖娥, 王艳芬. 2013. 河南鱼池岭钼矿有关花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素研究及其对成矿时代的制约. 高校地质学报, (3): 403–414
- 戴宝章, 蒋少涌, 王孝磊. 2009. 河南东沟钼矿花岗岩成因: 岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Sr-Nd-Hf 同位素制约. 岩石学报, 25: 2889–2901
- 段友强, 张正伟, 杨晓勇. 2015. 华北克拉通南缘张士英岩体大陆动力学背景: 来自地球化学、锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素的证据. 岩石学报, 31: 1995–2008
- 高昕宇, 赵太平, 高剑峰, 薛良伟, 原振雷. 2012. 华北陆块南缘小秦岭地区早白垩世埃达克质花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和元素地球化学特征. 地球化学, 41: 303–325
- 高昕宇, 赵太平, 原振雷, 周艳艳, 高剑峰. 2010. 华北陆块南缘中生代合峪花岗岩的地球化学特征与成因. 岩石学报, 26: 3485–3506
- 高昕宇. 2012. 华北克拉通南缘外方山和伏牛山地区早白垩世花岗岩成因研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学. 1–161
- 高亚龙, 张江明, 叶会寿, 孟芳, 周珂, 高阳. 2010. 东秦岭石窑沟斑岩钼矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 年龄. 岩石学报, 26: 729–739
- 郭波, 朱赖民, 李森, 弓虎军, 王建其. 2009. 华北陆块南缘华山和合峪花岗岩岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成与成岩动力学背景. 岩石学报, 25: 265–281
- 郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, Siebel W, 翟明国. 2005. 苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞-后碰撞构造过程: 锆石 U-Pb 年代学. 岩石学报, 4: 1281–1301
- 胡芳芳, 范宏瑞, 杨进辉, 万渝生, 刘敦一, 翟明国, 金成伟. 2004. 胶东乳山含金石英脉的成矿年龄: 热液锆石 SHRIMP 法 U-Pb 测定. 科学通报, 49: 183–205
- 胡芳芳, 范宏瑞, 杨进辉, 翟明国, 谢烈文, 杨岳衡, 柳小明. 2007. 鲁东昆嵛山地区官家辉长闪长岩成因: 岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素制约. 岩石学报, 23: 369–380
- 黄典豪, 侯增谦, 杨志明, 李振清, 许道学. 2009. 东秦岭钼矿带内碳酸岩脉型钼(铅)矿床地质-地球化学特征、成矿机制及成矿构造背景. 地质学报, 83: 1968–1984
- 黄凡, 罗照华, 卢欣祥, 陈必河, 杨宗峰. 2010. 河南汝阳地区竹园沟钼矿地质特征、成矿时代及地质意义. 地质通报, 29: 1704–1711
- 黄莹, 吴利仁. 1990. 陕西地区岩浆岩 Nd、Sr 同位素特征及其与大地构造发展的联系. 岩石学报, (02): 1–11
- 焦建刚, 袁海潮, 何克, 孙涛, 徐刚, 刘瑞平. 2009. 陕西华县八里坡钼矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义. 地质学报, 83: 1159–1166
- 柯昌辉, 王晓霞, 李金宝, 杨阳, 齐秋菊, 周晓宁. 2013. 华北地块南缘黑山-木龙沟地区中酸性岩的锆石 U-Pb 年龄、岩石化学和 Sr-Nd-Hf 同位素研究. 岩石学报, 29: 781–800
- 赖相濡. 2015. 熊耳山-外方山地区中生代花岗质岩石对金成矿作用的约束. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学. 1–57
- 李创举, 包志伟. 2010. 河南舞阳南部张士英岩体的地球化学与成因及其构造意义. 大地构造与成矿学, 34: 435–443
- 李厚民, 王登红, 王晓霞, 张长青, 李立兴. 2012. 华北地块南缘熊耳山早中生代正长花岗岩-Shrimp 锆石 U-Pb 年龄、地球化学及意义. 岩石矿物学杂志, 31: 771–782
- 李厚民, 叶会寿, 毛景文, 王登红, 陈毓川, 屈文俊, 杜安道. 2007. 小秦岭金(钼)矿床辉钼矿铼-钨定年及其地质意义. 矿床地质, 26: 417–424
- 李磊, 孙卫志, 孟宪锋, 杨小芬, 张灯堂, 冯建之. 2013. 华北陆块南缘崤山地区燕山期花岗岩地球化学、Sr-Nd-Pb 同位素特征及其地质意义. 岩石学报, 29: 2635–2652
- 李诺, 陈衍景, 孙亚莉, 胡海珠, 李晶, 张辉. 2009. 河南鱼池岭钼矿床辉钼矿铼-钨同位素年龄及地质意义. 岩石学报, 25: 413–421
- 李诺, 孙亚莉, 李晶, 薛良伟, 李文博. 2008. 小秦岭大湖金钼矿床辉钼矿铼钨同位素年龄及印支期成矿事件. 岩石学报, 24: 810–816
- 李铁刚, 武广, 陈毓川, 李宗彦, 杨鑫生, 乔翠杰. 2013. 豫西银家沟杂岩体年代学、地球化学和岩石成因. 岩石学报, 29: 46–66
- 李晓勇, 范蔚茗, 王岳军, 夏斌, 范立勇. 2006. 华北克拉通南缘早白垩世中基性火山岩成因及其地质意义. 大地构造与成矿学, 30: 220–230
- 李正远, 叶会寿, 曹晶, 张兴康, 霍雷. 2014. 河南嵩县庙岭金矿区花岗岩斑岩锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素特征. 岩石矿物学杂志, 33: 424–440
- 梁涛, 卢仁. 2015. 豫西崤山小妹河岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及地质意义. 地质通报, (8): 1526–1540
- 刘军, 武广, 贾守民, 李忠权, 孙亚莉, 钟伟. 2011. 豫西沙坡岭钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义. 矿物岩石, 31: 56–62
- 卢仁, 梁涛, 卢欣祥, 白凤军, 成静亮, 温静静. 2014. 豫西崤山龙卧沟岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及地质意义. 中国地质, 41: 756–772
- 马昌前, 杨坤光, 明厚利, 林广春. 2003. 大别山中生代地壳从挤压转向伸展的时间: 花岗岩的证据. 中国科学D辑: 地球科学, 33: 817–827
- 倪智勇. 2009. 河南小秦岭大湖金-钼矿床地球化学及其矿床成因. 博士学位论文. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所. 1–160
- 齐秋菊, 王晓霞, 柯昌辉, 李金宝. 2012. 华北地块南缘老牛山杂岩

- 体时代、成因及地质意义-锆石年龄、Hf同位素和地球化学新证据. 岩石学报, 28: 279-301
- 齐玥. 2014. 东秦岭地区晚中生代老君山岩体和太山庙岩体成因. 硕士学位论文. 合肥: 中国科学技术大学. 1-73
- 任纪舜. 1990. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿. 北京: 科学出版社. 1-205
- 邵济安, 张永北, 张履桥, 牟保磊, 王佩瑛, 郭峰. 2003. 大同地区早中生代煌斑岩-碳酸岩岩墙群. 岩石学报, 19: 93-104
- 孙卫东, 凌明星, 汪方跃, 丁兴, 胡艳华, 周继彬, 杨晓勇. 2008. 太平洋板块俯冲与中国东部中生代地质事件. 矿物岩石地球化学通报, 27: 218-225
- 唐克非. 2014. 华北克拉通南缘熊耳山地区金矿床时空演化、矿床成因及成矿构造背景. 博士学位论文. 武汉: 中国地质大学. 1-162
- 王赛, 叶会寿, 杨永强, 张兴康, 苏慧敏, 杨晨英. 2016. 豫西火神庙岩体锆石U-Pb年代学、地球化学及Hf同位素组成. 中国科学: 地球科学, 41: 293-361
- 王团华, 毛景文, 王彦斌. 2008a. 小秦岭-熊耳山地区岩墙锆石SHRIMP年代学研究——秦岭造山带岩石圈拆沉的证据. 岩石学报, 24: 1273-1287
- 王团华, 毛景文, 谢桂青, 叶安旺, 李宗彦. 2008b. 小秦岭、熊耳山金矿区内基性岩墙的岩石化学研究. 地学前缘, 15: 250-266
- 王团华, 毛景文, 谢桂青, 叶安旺, 李宗彦. 2008c. 小秦岭——熊耳山地区中基性岩墙的Sr、Nd、Pb同位素组成及其大地构造意义. 地质学报, 82: 1580-1591
- 王晓霞, 王涛, 齐秋菊, 李舫. 2011. 秦岭晚中生代花岗岩时空分布、成因演变及构造意义. 岩石学报, 27: 1573-1593
- 王义天, 毛景文, 卢欣祥. 2001. 嵩县祁雨沟金矿成矿时代的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学证据. 地质论评, 47: 551-555
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23: 1217-1238
- 吴福元, 杨进辉, 柳小明. 2005. 辽东半岛中生代花岗质岩浆作用的年代学格架. 高校地质学报, 11: 305-317
- 向君峰. 2009. 河南中部张士英岩体的成因研究. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学. 1-74
- 肖娥, 胡建, 张遵忠, 戴宝章, 王艳芬, 李海勇. 2012. 东秦岭花山复式岩基中蒿坪与金山庙花岗岩体岩石地球化学、锆石U-Pb年代学和Lu-Hf同位素组成. 岩石学报, 28: 4031-4046
- 肖鸿, 魏俊浩, 谭俊, 李欢, 贾盼盼, 石文杰, 杜保峰. 2012. 小秦岭地区早白垩世酸性侵入岩地球化学特征及构造环境. 地质科技情报, 31: 39-48
- 谢桂青, 毛景文, 李瑞玲, 叶会寿, 张毅星, 万渝生, 李厚民, 高建京, 郑榕芬. 2007. 东秦岭宝丰盆地大营组火山岩SHRIMP定年及其意义. 岩石学报, 23: 2387-2396
- 许成, 宋文磊, 漆亮, 王林均. 2009. 黄龙铺钼矿田含矿碳酸岩地球化学特征及其形成构造背景. 岩石学报, 25: 422-430
- 许道学. 2009. 河南鱼池岭斑岩钼矿床——岩浆作用与矿床成因. 硕士学位论文. 北京: 北京科技大学. 1-83
- 杨阳, 王晓霞, 柯昌辉, 李金宝. 2012. 豫西南泥湖矿集区石宝沟花岗岩体的锆石U-Pb年龄、岩石地球化学及Hf同位素组成. 中国地质, 39: 1525-1542
- 姚军明, 赵太平, 李晶, 孙亚莉, 原振雷, 陈伟, 韩军. 2009. 河南祁雨沟金成矿系统辉钼矿Re-Os年龄和锆石U-Pb年龄及Hf同位素地球化学. 岩石学报, 25: 374-384
- 叶会寿, 毛景文, 李永峰, 郭保健, 张长青, 刘王君, 闫全人, 刘国印. 2006. 东秦岭东沟超大型斑岩钼矿SHRIMP锆石U-Pb和辉钼矿Re-Os年龄及其地质意义. 地质学报, 80: 1078-1088
- 叶会寿, 毛景文, 徐林刚, 高建京, 谢桂清, 李向前, 何春芬. 2008. 豫西太山庙铝质A型花岗岩SHRIMP锆石U-Pb年龄及其地球化学特征. 地质论评, 54: 699-711
- 袁学诚. 1996. 中国地球物理图集. 北京: 地质出版社. 1-200
- 张灯堂, 冯建之, 李磊, 孟宪锋, 何进, 刘宗彦, 徐文超. 2015. 华北克拉通南缘后大陆碰撞背景下的岩石圈演化及金、钼成矿规律探讨. 大地构造与成矿学, (2): 300-314
- 张国伟, 郭安林, 刘福田, 孟庆任, 肖庆辉. 1996. 秦岭造山带三维结构及其动力学分析. 中国科学D辑: 地球科学, (增刊1): 1-6
- 张少兵, 郑永飞, 吴元保. 2007. 华南陆核的生长和再造: 锆石U-Pb年龄和Hf-O同位素研究. 岩石学报, 23: 393-402
- 张兴康, 叶会寿, 李正远, 曹晶, 王小雨. 2015. 小秦岭华山复式岩基大夫峪岩体锆石U-Pb年龄、Hf同位素和地球化学特征. 矿床地质, 34: 235-260
- 曾令君, 星玉才, 周栋, 赵太平, 姚军明, 包志伟. 2013. 河南卢氏八宝山花岗斑岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄和Hf同位素组成特征. 大地构造与成矿学, 37: 65-77
- 赵海杰, 毛景文, 叶会寿, 侯可军, 梁慧山. 2010a. 陕西洛南县石家湾钼矿相关花岗斑岩的年代学及岩石成因: 锆石U-Pb年龄及Hf同位素制约. 矿床地质, 29: 143-157
- 赵海杰, 毛景文, 叶会寿, 谢桂青, 杨宗喜. 2010b. 陕西黄龙铺地区碱性花岗斑岩及辉绿岩的年代学与地球化学: 岩石成因及其构造环境示踪. 中国地质, 37: 12-27
- 赵子福, 郑永飞. 2009. 俯冲大陆岩石圈重熔: 大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩成因. 中国科学D辑: 地球科学, 7: 888-909
- 周红升, 马昌前, 张超, 陈玲, 张金阳, 余振兵. 2008. 华北克拉通南缘泌阳春水燕山期铝质A型花岗岩类: 年代学、地球化学及其启示. 岩石学报, 24: 49-64
- 周珂. 2008. 豫西鱼池岭斑岩型钼矿床的地质地球化学特征与成因研究. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学. 1-90
- 朱赖民, 张国伟, 郭波, 李彝. 2008. 东秦岭金堆城大型斑岩钼矿床LA-ICP-MS锆石U-Pb定年及成矿动力学背景. 地质学报, 82: 204-220
- 朱赖民, 张国伟, 郭波, 李彝. 2009. 华北地块南缘钼矿床黄铁矿流体包裹体氦、氩同位素体系及其对成矿动力学背景的示踪. 科

- 学通报, 54: 1725–1735
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 刘俊来. 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制. *中国科学: 地球科学*, 41: 583–592
- Bao Z W, Sun W D, Zartman R E, Yao J M, Gao X Y. 2017. Recycling of subducted upper continental crust: Constraints on the extensive molybdenum mineralization in the Qinling-Dabie orogen. *Ore Geol Rev*, 81: 451–465
- Bao Z W, Wang C Y, Zhao T P, Li C Y, Gao X Y. 2014. Petrogenesis of the Mesozoic granites and Mo mineralization of the Luanchuan ore field in the East Qinling Mo mineralization belt, Central China. *Ore Geol Rev*, 57: 132–153
- Bartolini A, Larson R L. 2001. Pacific microplate and the Pangea supercontinent in the Early to Middle Jurassic. *Geology*, 29: 735–738
- Basu A R, Wang J, Huang W, Xie G, Tatsumoto M. 1991. Major element, REE, and Pb, Nd and Sr isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rocks of eastern China: Implications for their origin from suboceanic-type mantle reservoirs. *Earth Planet Sci Lett*, 105: 149–169
- Bea F, Montero P, Molina J F. 1999. Mafic precursors, peraluminous granitoids, and late lamprophyres in the Avila batholith: A model for the generation of Variscan batholiths in Iberia. *J Geol*, 107: 399–419
- Cai Y C, Fan H R, Santosh M, Liu X, Hu F F, Yang K F, Lan T G, Yang Y H, Liu Y. 2013. Evolution of the lithospheric mantle beneath the southeastern North China Craton: Constraints from mafic dikes in the Jiaobei terrain. *Gondwana Res*, 24: 601–621
- Chen Y J, Wang Y. 2011. Fluid inclusion study of the Tangjiaping Mo deposit, Dabie Shan, Henan Province: Implications for the nature of the porphyry systems of post-collisional tectonic settings. *Int Geol Rev*, 53: 635–655
- Davis G A, Darby B J, Yadong Z, Spell T L. 2002. Geometric and temporal evolution of an extensional detachment fault, Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China. *Geology*, 30: 1003–1006
- Deng J, Gong Q, Wang C, Carranza E J M, Santosh M. 2014. Sequence of Late Jurassic-Early Cretaceous magmatic-hydrothermal events in the Xiong'ershan region, Central China: An overview with new zircon U-Pb geochronology data on quartz porphyries. *J Asian Earth Sci*, 79: 161–172
- Ding L X, Ma C Q, Li J W, Robinson P T, Deng X D, Zhang C, Xu W C. 2011. Timing and genesis of the adakitic and shoshonitic intrusions in the Laoniushan complex, southern margin of the North China Craton: Implications for post-collisional magmatism associated with the Qinling Orogen. *Lithos*, 126: 212–232
- Fan W M, Zhang H F, Baker J, Jarvis K E, Mason P R D, Menzies M A. 2000. On and off the north China Craton: Where is the Archaean keel? *J Petrol*, 41: 933–950
- Finger F, Roberts M P, Haunschmid B, Schermaier A, Steyrer H P. 1997. Variscan granitoids of central Europe: Their typology, potential sources and tectonothermal relations. *Mineral Petrol*, 61: 67–96
- Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, Liu X M, Liu Y S, Xu W L, Ling W L, Ayers J, Wang X C, Wang Q H. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432: 892–897
- Gao X Y, Zhao T P, Bao Z W, Yang A Y. 2014a. Petrogenesis of the early Cretaceous intermediate and felsic intrusions at the southern margin of the North China Craton: Implications for crust-mantle interaction. *Lithos*, 206–207: 65–78
- Gao X Y, Zhao T P, Chen W T. 2014b. Petrogenesis of the early Cretaceous Funiushan granites on the southern margin of the North China Craton: Implications for the Mesozoic geological evolution. *J Asian Earth Sci*, 94: 28–44
- Goldfarb R J, Santosh M. 2014. The dilemma of the Jiaodong gold deposits: Are they unique? *Geosci Front*, 5: 139–153
- Guo P, Santosh M, Li S. 2013. Geodynamics of gold metallogeny in the Shandong Province, NE China: An integrated geological, geophysical and geochemical perspective. *Gondwana Res*, 24: 1172–1202
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, Ireland T, Walker D, Shuwen D. 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China. *Earth Planet Sci Lett*, 161: 215–230
- Han Y G, Zhang S H, Pirajno F, Zhou X W, Zhao G C, Qü W J, Liu S H, Zhang J M, Liang H B, Yang K. 2013. U-Pb and Re-Os isotopic systematics and zircon Ce^{4+}/Ce^{3+} ratios in the Shiyagou Mo deposit in eastern Qinling, central China: Insights into the oxidation state of granitoids and Mo (Au) mineralization. *Ore Geol Rev*, 55: 29–47
- Hart S R, Zindler A. 1986. In search of a bulk-Earth composition. *Chem Geol*, 57: 247–267
- He Y H, Zhao G C, Sun M, Han Y G. 2010. Petrogenesis and tectonic setting of volcanic rocks in the Xiaoshan and Waifangshan areas along the southern margin of the North China Craton: Constraints from bulk-rock geochemistry and Sr-Nd isotopic composition. *Lithos*, 114: 186–199
- He Y S, Li S G, Hoefs J, Kleinmanns I C. 2013. Sr-Nd-Pb isotopic compositions of Early Cretaceous granitoids from the Dabie orogen: Constraints on the recycled lower continental crust. *Lithos*, 156–159: 204–217
- Hou M L, Jiang Y H, Jiang S Y, Ling H F, Zhao K D. 2007. Contrasting origins of late Mesozoic adakitic granitoids from the northwestern Jiaodong Peninsula, east China: Implications for crustal thickening to delamination. *Geol Mag*, 144: 619–631
- Hu J, Jiang S Y, Zhao H X, Shao Y, Zhang Z Z, Xiao E, Wang Y F, Dai B Z, Li H Y. 2012. Geochemistry and petrogenesis of the Huashan granites and their implications for the Mesozoic tectonic settings in the Xiaolinling gold mineralization belt, NW China. *J Asian Earth Sci*, 56: 276–289

- Huang F, Li S, Dong F, He Y, Chen F. 2008. High-Mg adakitic rocks in the Dabie orogen, central China: Implications for foundering mechanism of lower continental crust. *Chem Geol*, 255: 1–13
- Huang F, Li S G, Dong F, Li Q L, Chen F K, Wang Y, Yang W. 2007. Recycling of deeply subducted continental crust in the Dabie Mountains, central China. *Lithos*, 96: 151–169
- Huang X L, Niu Y, Xu Y G, Yang Q J, Zhong J W. 2010. Geochemistry of TTG and TTG-like gneisses from Lushan-Taihua complex in the southern North China Craton: Implications for late Archean crustal accretion. *Precambrian Res*, 182: 43–56
- Huang X L, Wilde S A, Yang Q J, Zhong J W. 2012. Geochronology and petrogenesis of gray gneisses from the Taihua Complex at Xiong'er in the southern segment of the Trans-North China Orogen: Implications for tectonic transformation in the Early Paleoproterozoic. *Lithos*, 134–135: 236–252
- Jahn B, Wu F Y, Lo C H, Tsai C H. 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China. *Chem Geol*, 157: 119–146
- Keay S, Steele D, Compston W. 1999. Identifying granite sources by SHRIMP U-Pb zircon geochronology: An application to the Lachlan foldbelt. *Contrib Mineral Petrol*, 137: 323–341
- Kröner A, Compston W, Zhang G W, Guo A L, Todt W. 1988. Age and tectonic setting of Late Archean greenstone-gneiss terrain in Henan Province, China, as revealed by single-grain zircon dating. *Geology*, 16: 211–215
- Kusky T M, Windley B F, Zhai M G. 2007. Tectonic evolution of the North China Block: From orogen to craton to orogen. In: Zhai M G, Windley B F, Kusky T M, Meng Q R, eds. *Mesozoic Sub-Continental Lithospheric Thinning Under Eastern Asia*. Geological Society Special Publications. 1–34
- Li H Y, Wang X X, Ye H S, Yang L. 2012. Emplacement ages and petrogenesis of the Molybdenum-bearing granites in the Jinduicheng area of East Qinling, China: Constraints from zircon U-Pb ages and Hf isotopes. *Acta Geol Sin-Engl Ed*, 86: 661–679
- Li J W, Bi S J, Selby D, Chen L, Vasconcelos P, Thiede D, Zhou M F, Zhao X F, Li Z K, Qiu H N. 2012a. Giant Mesozoic gold provinces related to the destruction of the North China craton. *Earth Planet Sci Lett*, 349–350: 26–37
- Li J W, Li Z K, Zhou M F, Chen L, Bi S J, Deng X D, Qiu H N, Cohen B, Selby D, Zhao X F. 2012b. The Early Cretaceous Yangzhaiyu Lode gold deposit, north China Craton: A link between craton reactivation and gold veining. *Econ Geol*, 107: 43–79
- Li N, Chen Y J, Pirajno F, Gong H J, Mao S D, Ni Z Y. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, trace element and Hf isotope geochemistry of the Heyu granite batholith, eastern Qinling, central China: Implications for Mesozoic tectono-magmatic evolution. *Lithos*, 142–143: 34–47
- Li Z X, Li X H. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35: 179
- Liégeois J P, Navez J, Hertogen J, Black R. 1998. Contrasting origin of post-collisional high-K calc-alkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoids. The use of sliding normalization. *Lithos*, 45: 1–28
- Ling W L, Ren B F, Duan R C, Liu X M, Mao X W, Peng L H, Liu Z X, Cheng J P, Yang H M. 2008. Timing of the Wudangshan, Yaolinghe volcanic sequences and mafic sills in South Qinling: U-Pb zircon geochronology and tectonic implication. *Chin Sci Bull*, 53: 2192–2199
- Liu D, Wilde S A, Wan Y, Wang S, Valley J W, Kita N, Dong C, Xie H, Yang C, Zhang Y, Gao L. 2009. Combined U-Pb, hafnium and oxygen isotope analysis of zircons from meta-igneous rocks in the southern North China Craton reveal multiple events in the Late Mesoproterozoic-Early Neoproterozoic. *Chem Geol*, 261: 140–154
- Liu J L, Davis G A, Lin Z Y, Wu F Y. 2005. The Liaonan metamorphic core complex, Southeastern Liaoning Province, North China: A likely contributor to Cretaceous rotation of Eastern Liaoning, Korea and contiguous areas. *Tectonophysics*, 407: 65–80
- Liu S, Hu R Z, Gao S, Feng C X, Qi Y Q, Wang T, Feng G Y, Coulson I M. 2008. U-Pb zircon age, geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints on age and origin of alkaline intrusions and associated mafic dikes from Sulu orogenic belt, Eastern China. *Lithos*, 106: 365–379
- Ma L, Jiang S Y, Hou M L, Dai B Z, Jiang Y H, Yang T, Zhao K D, Pu W, Zhu Z Y, Xu B. 2014. Geochemistry of Early Cretaceous calc-alkaline lamprophyres in the Jiaodong Peninsula: Implication for lithospheric evolution of the eastern North China Craton. *Gondwana Res*, 25: 859–872
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geol Soc Am Bull*, 101: 635–643
- Mao J W, Pirajno F, Xiang J F, Gao J J, Ye H S, Li Y F, Guo B J. 2011. Mesozoic molybdenum deposits in the east Qinling-Dabie orogenic belt: Characteristics and tectonic settings. *Ore Geol Rev*, 43: 264–293
- Mao J W, Xie G Q, Bierlein F, Qü W J, Du A D, Ye H S, Pirajno F, Li H M, Guo B J, Li Y F, Yang Z Q. 2008. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt. *Geochim Cosmochim Acta*, 72: 4607–4626
- Mao J W, Xie G Q, Pirajno F, Ye H S, Wang Y B, Li Y F, Xiang J F, Zhao H J. 2010. Late Jurassic-Early Cretaceous granitoid magmatism in Eastern Qinling, central-eastern China: SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications. *Aust J Earth Sci*, 57: 51–78

- Menzies M A, Fan W M, Zhang M. 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archaean lithosphere, Sino-Korean craton, China. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 76: 71–81
- Middlemost E A K. 1985. *Magmas and Magmatic Rocks: An Introduction to Igneous Petrology*. London: Longman Group. 266
- Miller C F, McDowell S M, Mapes R W. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. *Geology*, 31: 529–532
- Ni Z Y, Chen Y J, Li N, Zhang H. 2012. Pb-Sr-Nd isotope constraints on the fluid source of the Dahu Au-Mo deposit in Qinling Orogen, central China, and implication for Triassic tectonic setting. *Ore Geol Rev*, 46: 60–67
- Peccherillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contrib Mineral Petrol*, 58: 63–81
- Peng P, Zhai M G, Ernst R E, Guo J H, Liu F, Hu B. 2008. A 1.78 Ga large igneous province in the North China craton: The Xiong'er Volcanic Province and the North China dyke swarm. *Lithos*, 101: 260–280
- Peng Z C, Zartman R E, Futa K, Chen D G. 1986. Pb-, Sr- and Nd-isotopic systematics and chemical characteristics of Cenozoic basalts, eastern China. *Chem Geol-Isot Geosce Sec*, 59: 3–33
- Ren J Y, Tamaki K, Li S T, Zhang J X. 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 344: 175–205
- Ritts B D, Darby B J, Cope T. 2001. Early Jurassic extensional basin formation in the Daqing Shan segment of the Yinshan belt, northern North China Block, Inner Mongolia. *Tectonophysics*, 339: 239–258
- Roberts M P, Clemens J D. 1993. Origin of high-potassium, calc-alkaline, I-type granitoids. *Geology*, 21: 825–828
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 42: 313–345
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45: 29–44
- Tang K F, Li J W, Selby D, Zhou M F, Bi S J, Deng X D. 2013. Geology, mineralization, and geochronology of the Qianhe gold deposit, Xiong'er shan area, southern North China Craton. *Miner Depos*, 48: 729–747
- Tang Y J, Zhang H F, Santosh M, Ying J F. 2013. Differential destruction of the North China Craton: A tectonic perspective. *J Asian Earth Sci*, 78: 71–82
- Tian Y, Zhao D P. 2011. Destruction mechanism of the North China Craton: Insight from *P* and *S* wave mantle tomography. *J Asian Earth Sci*, 42: 1132–1145
- Van Staal C, De Roo J. 1995. Mid-Paleozoic tectonic evolution of the Appalachian Central Mobile Belt in northern New Brunswick, Canada: Collision, extensional collapse and dextral transpression. In: Hibbard J P, van Staal C R, Cawood P A, eds. *Current Perspectives in the Appalachian-Caledonian Orogen*. Geol Assoc Can Spec Paper, 41: 367–389
- Van Wagoner N A, Leybourne M I, Dadd K A, Baldwin D K, McNeil W. 2002. Late Silurian bimodal volcanism of southwestern New Brunswick, Canada: Products of continental extension. *Geol Soc Am Bull*, 114: 400–418
- Waight T E, Weaver S D, Muir R J. 1998. Mid-Cretaceous granitic magmatism during the transition from subduction to extension in southern New Zealand: A chemical and tectonic synthesis. *Lithos*, 45: 469–482
- Wan Y S, Wilde S A, Liu D Y, Yang C X, Song B, Yin X Y. 2006. Further evidence for ~1.85 Ga metamorphism in the Central Zone of the North China Craton: SHRIMP U-Pb dating of zircon from metamorphic rocks in the Lushan area, Henan Province. *Gondwana Res*, 9: 189–197
- Wang C M, Chen L, Bagas L, Lu Y J, He X Y, Lai X R. 2015. Characterization and origin of the Taishanmiao aluminous A-type granites: Implications for Early Cretaceous lithospheric thinning at the southern margin of the North China Craton. *Int J Earth Sci*: 1–27
- Wang L J, Griffin W L, Yu J H, O'Reilly S Y. 2013. U-Pb and Lu-Hf isotopes in detrital zircon from Neoproterozoic sedimentary rocks in the northern Yangtze Block: Implications for Precambrian crustal evolution. *Gondwana Res*, 23: 1261–1272
- Wang Q, Wyman D A, Xu J F, Jian P, Zhao Z H, Li C F, Xu W, Ma J L, He B. 2007. Early Cretaceous adakitic granites in the Northern Dabie Complex, central China: Implications for partial melting and delamination of thickened lower crust. *Geochim Cosmochim Acta*, 71: 2609–2636
- Wang X L, Jiang S Y, Dai B Z. 2010. Melting of enriched Archean subcontinental lithospheric mantle: Evidence from the ca. 1760 Ma volcanic rocks of the Xiong'er Group, southern margin of the North China Craton. *Precambrian Res*, 182: 204–216
- Wang X X, Wang T, Ke C H, Yang Y, Li J B, Li Y H, Qi Q J, Lv X Q. 2015. Nd-Hf isotopic mapping of Late Mesozoic granitoids in the East Qinling orogen, central China: Constraint on the basements of terranes and distribution of Mo mineralization. *J Asian Earth Sci*, 103: 169–183
- Wang Y J, Fan W M, Peng T P, Zhang H F, Guo F. 2005. Nature of the Mesozoic lithospheric mantle and tectonic decoupling beneath the Dabie Orogen, Central China: Evidence from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology, elemental and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of early Cretaceous mafic igneous rocks. *Chem Geol*, 220: 165–189
- Wang Y T, Mao J W, Lu X X, Ye A W. 2002. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ dating and geological implication of auriferous altered rocks from the middle-

- deep section of Q875 gold-quartz vein in Xiaoqinling area, Henan, China. *Chin Sci Bull*, 47: 1750–1755
- Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, Zhang X, Yang J H. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth Planet Sci Lett*, 233: 103–119
- Wu Y B, Zheng Y F. 2013. Tectonic evolution of a composite collision orogen: An overview on the Qinling-Tongbai-Hong'an-Dabie-Sulu orogenic belt in central China. *Gondwana Res*, 23: 1402–1428
- Xie Z, Zheng Y F, Zhao Z F, Wu Y B, Wang Z R, Chen J F, Liu X M, Wu F Y. 2006. Mineral isotope evidence for the contemporaneous process of Mesozoic granite emplacement and gneiss metamorphism in the Dabie orogen. *Chem Geol*, 231: 214–235
- Xu H J, Ma C Q, Ye K. 2007. Early cretaceous granitoids and their implications for the collapse of the Dabie orogen, eastern China: SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemistry. *Chem Geol*, 240: 238–259
- Xu W L, Gao S, Wang Q H, Wang D Y, Liu Y S. 2006. Mesozoic crustal thickening of the eastern North China craton: Evidence from eclogite xenoliths and petrologic implications. *Geology*, 34: 721
- Xu X S, Griffin W L, Ma X, O'Reilly S Y, He Z Y, Zhang C L. 2009. The Taihua group on the southern margin of the North China craton: Further insights from U-Pb ages and Hf isotope compositions of zircons. *Miner Petrol*, 97: 43–59
- Xu Y G, Li H Y, Pang C J, He B. 2009. On the timing and duration of the destruction of the North China Craton. *Chin Sci Bull*, 54: 3379–3396
- Xue F, Rowley D B, Tucker R D, Peng Z X. 1997. U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the north Dabie complex, eastern Dabie Shan, China. *J Geol*, 105: 744–753
- Yang J, Gao S, Yuan H L, Gong H J, Zhang H, Xie S W. 2007. Detrital Zircon ages of Hanjiang River: Constraints on evolution of northern Yangtze craton, South China. *J China Uni Geosci*, 18: 210–222
- Yang J H, Chung S L, Wilde S A, Wu F, Chu M F, Lo C H, Fan H R. 2005. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: Geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence. *Chem Geol*, 214: 99–125
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, Wilde S A, Chu M F. 2006. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, northeast China: Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence. *Lithos*, 89: 89–106
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, Belousova E, Griffin W L. 2008a. Mesozoic decratonization of the North China block. *Geology*, 36: 467–470
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, Chen F, Liu X M, Xie L W. 2008b. Petrogenesis of an alkali syenite-granite-rhyolite suite in the Yanshan Fold and Thrust Belt, Eastern North China Craton: Geochronological, geochemical and Nd-Sr-Hf isotopic evidence for lithospheric thinning. *J Petrol*, 49: 315–351
- Yang L, Chen F K, Liu B X, Hu Z P, Qi Y, Wu J D, He J F, Siebel W. 2013. Geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic composition of the Donggou Mo-bearing granite porphyry, Qinling orogenic belt, central China. *Int Geol Rev*, 55: 1261–1279
- Yang Q Y, Santosh M, Shen J F, Li S R. 2014. Juvenile vs. recycled crust in NE China: Zircon U-Pb geochronology, Hf isotope and an integrated model for Mesozoic gold mineralization in the Jiaodong Peninsula. *Gondwana Res*, 25: 1445–1468
- Yang W, Teng F Z, Zhang H F, Li S G. 2012. Magnesium isotopic systematics of continental basalts from the North China craton: Implications for tracing subducted carbonate in the mantle. *Chem Geol*, 328: 185–194
- Yang Z F. 2012. Combining quantitative textural and geochemical studies to understand the solidification processes of a granite porphyry: Shanggusi, east Qinling, China. *J Petrol*, 53: 1807–1835
- Yang Z F, Luo Z H, Lu X X, Huang F, Chen B H, Zhou J L, Cheng L L. 2014. The role of external fluid in the Shanggusi dynamic granitic magma system, East Qinling, China: Quantitative integration of textural and chemical data. *Lithos*, 208–209: 339–360
- Zhai M, Santosh M. 2013. Metallogeny of the North China Craton: Link with secular changes in the evolving Earth. *Gondwana Res*, 24: 275–297
- Zhang H F. 2012. Destruction of ancient lower crust through magma underplating beneath Jiaodong Peninsula, North China Craton: U-Pb and Hf isotopic evidence from granulite xenoliths. *Gondwana Res*, 21: 281–292
- Zhang H F, Gao S, Zhong Z Q, Zhang B R, Zhang L, Hu S H. 2002. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of Cretaceous granitoids: Constraints on tectonic framework and crustal structure of the Dabieshan ultrahigh-pressure metamorphic belt, China. *Chem Geol*, 186: 281–299
- Zhang H F, Zhu R X, Santosh M, Ying J F, Su B X, Hu Y. 2013. Episodic widespread magma underplating beneath the North China Craton in the Phanerozoic: Implications for craton destruction. *Gondwana Res*, 23: 95–107
- Zhang J J, Zheng Y D. 1999. Multistage extension and age dating of the Xiaoqinling metamorphic core complex, central China. *Acta Geol Sin-Engl Ed*, 73: 139–147
- Zhao D P, Maruyama S, Omori S. 2007. Mantle dynamics of Western Pacific and East Asia: Insight from seismic tomography and mineral physics. *Gondwana Res*, 11: 120–131
- Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, Sun M. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Res*, 107: 45–73
- Zhao H X, Jiang S Y, Frimmel H E, Dai B Z, Ma L. 2012. Geochemistry, geochronology and Sr-Nd-Hf isotopes of two Mesozoic granitoids in the Xiaoqinling gold district: Implication for large-scale lithospheric

- thinning in the North China Craton. *Chem Geol*, 294-295: 173–189
- Zhao T P, Zhai M G, Xia B, Li H M, Zhang Y X, Wan Y S. 2004. Study on the zircon SHRIMP ages of the Xiong'er Group volcanic rocks: Constraint on the starting time of covering strata in the North China Craton. *Chin Sci Bull*, 9: 2495–2502
- Zhao Z F, Zheng Y F, Wei C S, Wu Y B. 2004. Zircon isotope evidence for recycling of subducted continental crust in post-collisional granitoids from the Dabie terrane in China. *Geophys Res Lett*, 31: L22602
- Zhao Z F, Zheng Y F, Wei C S, Wu Y B. 2007. Post-collisional granitoids from the Dabie orogen in China: Zircon U-Pb age, element and O isotope evidence for recycling of subducted continental crust. *Lithos*, 93: 248–272
- Zhu G, Jiang D, Zhang B, Chen Y. 2012. Destruction of the eastern North China Craton in a backarc setting: Evidence from crustal deformation kinematics. *Gondwana Res*, 22: 86–103
- Zhu G, Niu M L, Xie C L, Wang Y S. 2010. Sinistral to normal faulting along the Tan-Lu Fault Zone: Evidence for geodynamic switching of the east China continental margin. *J Geol*, 118: 277–293
- Zhu X Y, Chen F, Liu B X, Siebel W. 2013. Zircon U-Pb and K-feldspar megacryst Rb-Sr isotopic ages and Sr-Hf isotopic composition of the Mesozoic Heyu pluton, eastern Qingling orogen, China. *Lithos*, 156-159: 31–40