

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*

段友强¹ 张正伟² 杨晓勇^{1**}

DUAN YouQiang¹, ZHANG ZhengWei² and YANG XiaoYong^{1**}

1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

2. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002

1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

2014-08-22 收稿, 2014-12-30 改回.

Duan YQ, Zhang ZW and Yang XY. 2015. The continental dynamics of Zhangshiyong pluton at the southern margin of the North China Craton: Evidence from geochemical, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions. *Acta Petrologica Sinica*, 31(7): 1995–2008

Abstract The Zhangshiyong pluton is located in the southern margin of the North China Craton. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating for Zhangshiyong quartz syenite pluton yield 122.8 ± 1.5 Ma. Those quartz syenite are alkaline rocks with $\text{SiO}_2 = 66.04\% \sim 67.80\%$, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 9.03\% \sim 10.97\%$, $\text{K}_2\text{O} = 4.40\% \sim 6.37\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$, $A/\text{CNK} = 1.26 \sim 1.58$, and $A/\text{NK} = 1.63 \sim 1.79$. $\text{Mg}^\#$ ranges from 12.9 to 39.4. They are enriched in LREE and depleted in HREE. There is obvious partition of LREE from HREE with $(\text{La}/\text{Yb})_N = 15.48 \sim 21.12$, and with slightly negative Eu-anomaly ($\delta\text{Eu} = 0.54 \sim 0.99$), and it is enriched in LILE e.g. Rb, K, Th, U, and depleted in HFSE, e.g. Nb, Ta, P and Ti. The $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ for quartz syenite ranges from -17.6 to -13.9 , with t_{DM2} of 1.7 ~ 1.9 Ga. Its magma zirconium saturation temperature ranges between 940 ~ 1000°C. Geochemical and isotopic composition indicate that the source of the Zhangshiyong pluton is mainly old lower crust and minor juvenile composition. The juvenile composition is mainly from mantle. The pluton was generated under an extensional setting. The extensional setting induced mantle magma upwelling, providing heat and causing the partial melting of the bottom crust. The age of pluton is at the same time of the lithospheric thinning and destruction of the North China craton. Zhang Shiyong pluton is the response of this geological event.

Key words Zhangshiyong pluton; Zircon U-Pb dating; Hf isotope; Alkaline rocks; Southern margin of the North China Craton

摘要 张士英岩体位于华北克拉通南缘, 岩体主要由石英正长岩组成。石英正长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 122.8 ± 1.5 Ma。其 SiO_2 含量为 $66.04\% \sim 67.80\%$, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 9.03\% \sim 10.97\%$, $\text{K}_2\text{O} = 4.40\% \sim 6.37\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$ 属于钾质长英质岩石。 $A/\text{CNK} = 1.26 \sim 1.58$, $A/\text{NK} = 1.63 \sim 1.79$ 属于过铝质岩石系列。石英正长岩的 $\text{Mg}^\#$ 变化范围在 12.9 ~ 39.4。富集 LREE 亏损 HREE, 轻重稀土分异明显, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 15.48 \sim 21.12$, Eu 呈弱的负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.54 \sim 0.99$)。富集 Rb、K、Th、U 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素。张士英石英正长岩岩浆锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 集中在 $-17.6 \sim -13.9$, Hf 两阶段模式年龄 t_{DM2} 集中在 1.7 ~ 1.9 Ga。石英正长岩的岩浆 Zr 饱和温度高 (936 ~ 998°C)。地球化学及同位素显示张士英石英正长岩区主要为古老的壳源物质, 并有少量年轻组分加入, 这种年轻组分是幔源物质。岩体形成于拉张性构造环境下, 拉张性的环境导致了幔源物质的上涌, 底侵下地壳使其发生部分熔融。形成时代正好位于华北克拉通破坏峰期, 张士英石英正长岩正是这一地质事件的响应。

关键词 张士英岩体; 锆石 U-Pb 定年; Hf 同位素; 碱性岩; 华北南缘

中图法分类号 P588.122; P597.3

* 本文受国家自然科学基金项目 (41090372、40921002) 和中国科学院知识创新项目 (KZCX1-YW-45-3) 联合资助。

第一作者简介: 段友强, 男, 1989 年生, 硕士生, 地球化学专业

** 通讯作者: 杨晓勇, 男, 教授, 矿床地球化学专业, E-mail: xyang555@163.com

1 引言

秦岭造山带是中央造山带的重要组成部分,自北向南由栾川断裂和勉县洛阳断裂两条缝合线将秦岭造山带分成三个部分,即栾川断裂以北的华北陆块南缘,与勉县洛阳断裂之间的秦岭微陆块,及勉县洛阳断裂以南的扬子地块北缘(张国伟等,2001)。秦岭造山带为复合型造山带,经历了元古代、古生代和中生代造山运动。发育了大量的侵入岩,新元古代时期经历了陆块汇聚与裂解的构造岩浆事件形成同碰撞-后碰撞花岗岩系(Wang *et al.*, 2003)。古生代时期,北秦岭沿商丹断裂带一线俯冲增生及碰撞,伴有大量花岗岩侵入的构造岩浆热事件(Ratschbacher *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2005)。中生代整个秦岭造山带经历了强烈的早中生代构造岩浆热事件,形成大量中生代花岗岩体。华北克拉通南缘的东秦岭钼矿带是中国重要的大型钼矿分布区之一,产出了金堆城、南泥湖、三道庄、上房沟等五个超大型钼矿床和雷门沟等十余处大中型钼(钨)多金属矿床,其中钼金属储量约占全国总储量的66%(Mao *et al.*, 2011)。前人曾将中生代划分出三期成矿作用:235~220Ma, 150~135Ma和130~110Ma,并提出区内大规模的成矿作用和同时期的岩浆作用存在密切关系(Mao *et al.*, 2003, 2008)。因此对区内岩浆岩的研究有助于理解大规模成矿作用的地质背景。

近年来一些研究表明在华北南缘发育一系列形成于拉张环境下的与岩石圈减薄或转型有关的中生代岩浆岩。如

早白垩世A型花岗岩、基性岩墙群、及钾质玄武岩(叶会寿等,2008;王团华等,2008;谢桂青等,2007)。张士英岩体位于舞阳南部(图1),东秦岭东端,紧邻西大别,为一套富碱性侵入岩。碱性岩是地球上产出环境特殊的一种岩石类型,分布较少,主要形成于岩石圈拉张环境。碱性岩可能与碰撞造山作用、下地壳拆沉减薄作用、壳-幔相互作用等深部地质过程有密切的成因联系是深部地球动力学过程在浅部地壳的直接表现(Karmalkar *et al.*, 2005)。因此对该岩体的研究有助于我们理解华北地台南缘乃至整个中国东部在晚中生代的演化。前人曾对张士英岩体的岩石地球化学特征及岩体形成时代进行过详细研究。但就成岩时代和岩浆源区存在较大的争议。笔者之一曾获得全岩的Rb-Sr等时线年龄为 133.4 ± 0.5 Ma(张正伟等,2000)。李创举和包志伟(2010)对张士英岩体进行锆石LA-ICP-MS的U-Pb定年测得的结果为 124.2 ± 0.5 Ma。认为岩浆形成过程是软流圈地幔岩浆底侵造成的下地壳部分熔融及壳幔混合过程。而向君峰等(2010)对张士英岩体进行了划分并测得钾长花岗岩、似斑状花岗岩和石英斑岩脉的SHRIMP锆石U-Pb年龄分别为 107.3 ± 2.4 Ma、 106.7 ± 2.5 Ma和 101 ± 3 Ma。认为岩浆是1.9~2.3Ga期间新生地壳部分熔融形成的。精细的成岩成矿年龄是探讨成矿作用地质背景及其发生发展过程的基础。所以有必要对张士英岩体进行系统的研究。本文通过对张士英岩体进行主微量元素分析,并对锆石进行LA-ICP-MS U-Pb定年和Hf同位素的分析,重新确定了岩体的形成年龄,并结合最新区域地质研究数据对岩体的物质源区进行了进一

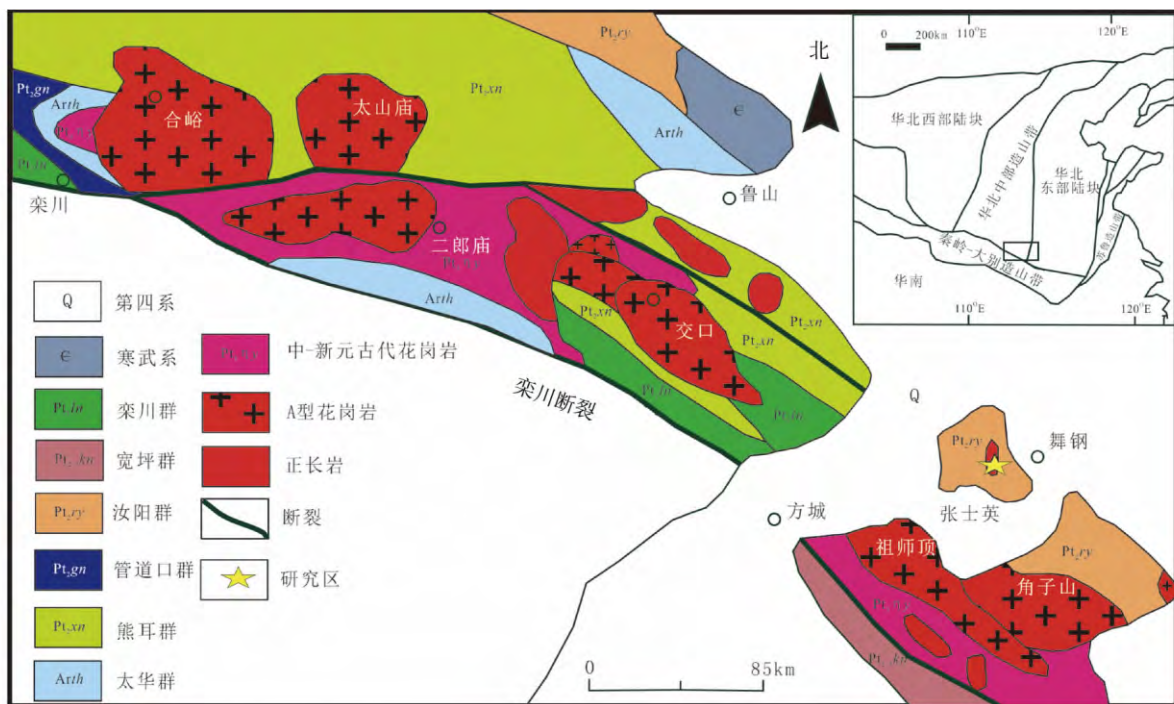


图1 张士英岩体所处地理位置与构造环境(据刘振宏等 2004)

Fig.1 Location and simplified geological map of Zhangshiying pluton (modified after Liu *et al.*, 2004)

步限制,并探讨了成岩模式及形成时的动力学背景。

2 区域地质背景与样品特征

华北地块南缘是秦岭造山带后陆逆冲断裂褶皱带(张正伟等,2002),区内出露的地层有太华群结晶基底,为一套中高级变质的中基性-中酸性火山沉积变质岩系,主要由英云闪长质-奥长花岗质-花岗闪长质(TTG)片麻岩和斜长角闪岩组成。片麻岩形成时代主要集中于新太古代(2.84~2.76Ga)(Liu *et al.*,2009)。斜长角闪岩的年龄主要集中于两个时间段 2.84~2.54Ga 和 2.50~2.28Ga(Wan *et al.*,2006; Xu *et al.*,2009; Liu *et al.*,2009)。区内还出露中新元古代的熊耳群、汝阳群。中元古界熊耳群为一套中基性-中酸性双峰式火山岩夹海陆相碎屑沉积的火山沉积岩系,呈角度不整合覆盖于太华群结晶基底之上,是华北克拉通南缘最主要的盖层岩系。锆石的 U-Pb 年代学研究表明其形成于 1.75~1.95Ga 之间,单阶段 t_{DM1} 为 2.66Ga(赵太平等,2001; Zhao *et al.*,2004)。中元古界汝阳群为一套滨海相碎屑岩-碳酸盐岩沉积建造覆盖于熊耳群之上。

区内岩浆岩广泛发育,具有多期次特征。以燕山期花岗岩岩浆活动最为强烈,该期次花岗岩分为大岩基和小斑岩体。大岩基主要以黑云二长花岗岩及黑云母花岗岩为主,被认为是陆壳重熔型花岗岩(张宗清等,2002; 李先梓等,1993)。小斑岩体多与钼矿化有成因关系(Chen *et al.*,2000; 朱赖民等,2008)。已有年龄数据显示花岗岩侵入于 160~110Ma,岩石类型具有多样性,显示从 S 型-I 型-A 型演化趋势(毛景文等,2005; 李永峰等,2005; 朱赖民等,2008; Mao *et al.*,2011)。在靠近黑沟-栾川-确山深大断裂带及两侧,自西向东陆续出现了 30 多个富碱侵入岩岩体,空间上构成约 400km 的富碱侵入岩带。在岩带横向上,自北向南按照不同的岩石组合类型进一步划分为三个亚带,即北亚带为霓辉正长岩-正长岩;中部亚带为碱性花岗岩-钾长花岗岩;南部亚带为石英正长岩-霞石正长岩带。北亚带中亚带以石门-马超营断裂为界,中亚带与南亚带以黑沟栾川断裂为界(张正伟等,2002)。

张士英岩体位于河南舞钢-方城之间(图 1),本岩区地处华北陆块南缘,分布于舞阳张士英、马庄、房庄一带。区内断裂构造发育,直接控制着碱性岩的分布,在 25km² 范围内,出露大小多个碱性岩体,其中张士英岩体出露面积 5.5km²,呈小岩株产出,近南北向展布。平面上呈不规则椭圆形,与围岩太华群、熊耳群和汝阳群呈侵入接触,接触面产状较陡,呈不规则港湾状,主要岩石类型为石英正长岩。

石英正长岩,呈肉红色,中细粒花岗结构,交代环斑结构,块状构造。主要矿物钾长石占 55%,斜长石 20%,石英 5%~10%,角闪石 5%;次要矿物有黑云母及少量透辉石;副矿物有磁铁矿、榍石、钛铁矿。钾长石主要为微斜长石,呈它形、半自形板状、柱状,部分为粒状,粒径 1~5mm,多与更长

石组成条纹状构造,格子双晶不明显,个别具卡氏双晶,强烈交代斜长石,多以蚕蚀或穿孔式交代斜长石,形成斜长石团块或包体,或形成环斑状结构;斜长石半自形-他形板柱状或交代残留体,粒径 1~5mm。部分具聚片和卡氏复合双晶,具绢云母化和泥化现象。石英呈灰白、乳白色,它形粒状,粒径 0.5~2mm,多呈填隙状分布于长石间。角闪石深绿-绿色、半自形粒状或针状,部分呈残留体。粒径 0.2~2mm,常被绢云母和绿泥石交代,且与少量透辉石、黑云母共生。

此外前人对该地区的其它岩石类型进行过研究,包括钾长花岗岩、似斑状花岗岩和石英斑岩脉(向君峰等,2010)。但由于其缺少主量、微量元素数据本文未能与其很好地进行综合讨论。

3 分析方法

全岩的主量元素和微量元素分析在广州澳实矿物实验室完成。主量元素分析采用 X 射线荧光熔片法完成,分析精度分别为: SiO₂, 0.8%; Al₂O₃, 0.5%; Fe₂O₃, 0.4%; MgO, 0.4%; CaO, 0.6%; Na₂O, 0.3%; K₂O, 0.4%; MnO, 0.7%; TiO₂, 0.9%; P₂O₅, 0.8%。微量元素分析采用 HF+HNO₃ 溶解样品,加入 Rh 内标溶液,用 PE Elan6000 型 ICP-MS 完成测定,分析精度优于 5%。

锆石的单矿物分选由河北廊坊地质调查院完成。在双目镜下观察分选好的锆石,将晶形好、无裂隙和包裹体的锆石挑出,用环氧树脂制靶。将锆石靶打磨、抛光,然后拍摄反射光、透射光显微照相和阴极发光(CL)显微照片。锆石的阴极发光在中国科学技术大学理化科学实验中心扫描电镜实验室完成,所用仪器为 FEI 公司生产的 Sirion200 型电子显微镜。

锆石的微区原位 U-Pb 定年和微量元素分析在广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室利用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)完成。仪器采用美国 Resonetics 公司生产的 RESOLUTION M-50 激光剥蚀系统和 Agilent 7500a 型的 ICP-MS 联机。用 He 作为剥蚀物质的载气。用美国国家标准技术研究院人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 进行仪器最佳化,使仪器达到最佳的灵敏度、最小的氧化物产率(CeO/Ce < 3%)和最低的背景值。实验采用标准锆石 TEMORA(Black *et al.*,2003)作为测年外标,所测元素激光斑束直径为 31μm,频率为 8Hz。相关分析方法详见(涂湘林等,2011)。数据处理使用软件 ICPMSDataCal 7.2(Liu *et al.*,2008)。锆石的谐和年龄图绘制和年龄计算采用软件 Isoplot3.0(Ludwig,2003)。

锆石的微区原位 Lu-Hf 同位素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。所用质谱为 Nu Plasma 型多接收电感耦合等离子体质谱(MC-ICP-MS),激光剥蚀系统为 193nm ArF 准分子激光器的 GeoLas 2005。激光斑束直径为 44μm,激光脉冲频率为 8Hz。具体分析方法和仪器参数详见

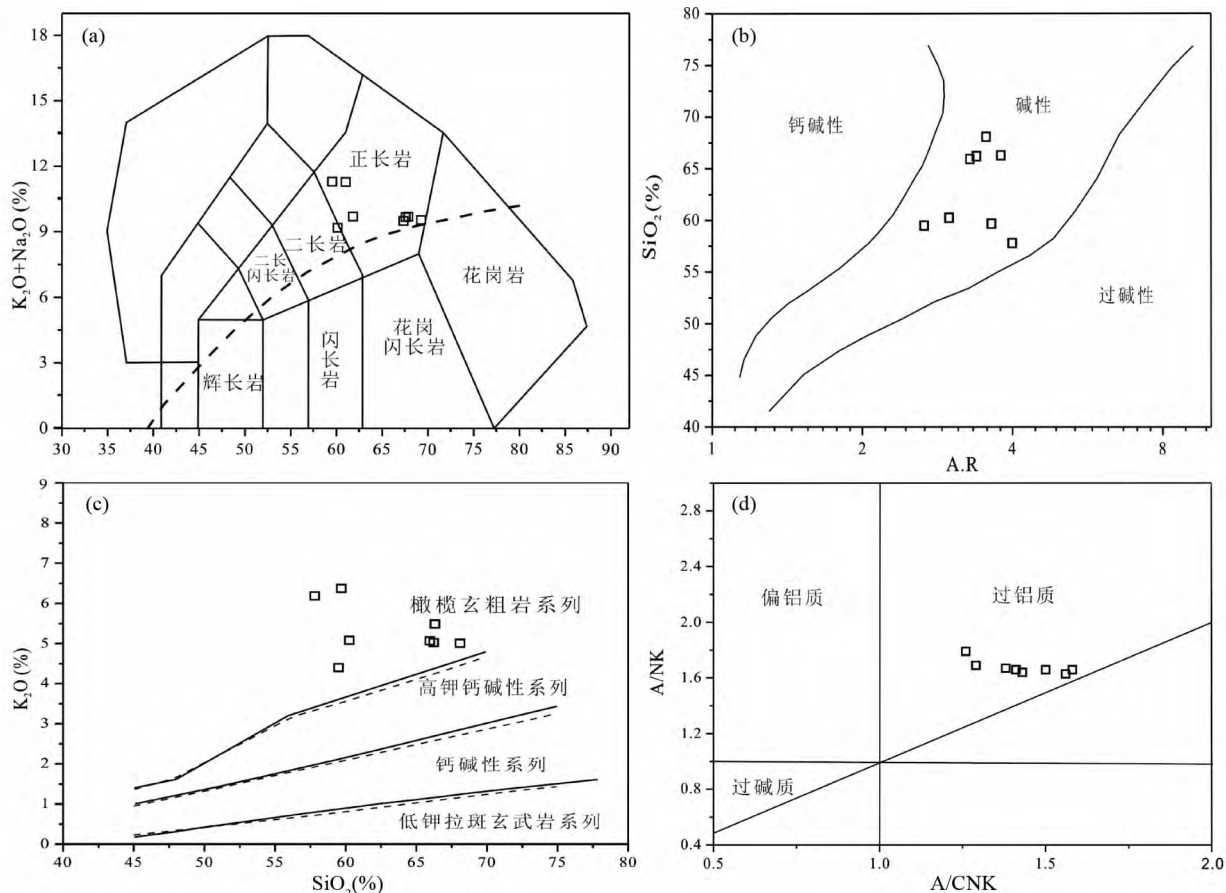


图2 张士英石英正长岩的主要元素关系图(a, 据 Middlemost, 1994; c, 据 Peccerillo and Taylor, 1976; d, 据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 2 Major element variation diagrams of Zhangshiying quartz syenite (a, after Middlemost, 1994; c, after Peccerillo and Taylor, 1976; d, after Maniar and Piccoli, 1989)

(Yuan *et al.*, 2008)。用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu} = 0.02655$ (De Bièvre and Taylor, 1993) 和 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb} = 0.58545$ (Chu *et al.*, 2001) 作为校正因子来进行同质异位干扰校正, 计算样品的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 。以标准锆石 MON-1、GJ-1、91500 作为外标, 其推荐的标准值依次为 0.282739 ± 0.000057 , 0.282015 ± 0.000056 , 0.282307 ± 0.000055 。在进行 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 计算时, 采用 ^{176}Lu 衰变常数($= 1.867 \times 10^{-11} \text{ year}^{-1}$) (Söderlund *et al.*, 2004), 球粒陨石现今的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282772$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0332$ (Blichert and Albarède, 1997)。在进行模式年龄计算时, 采用现今的亏损地幔 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.28325$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0384$ (Griffin *et al.*, 2000), 现今平均大陆壳的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.015$ (Griffin *et al.*, 2002)。

4 分析结果

4.1 全岩主量元素特征

石英正长岩的全岩主微量元素结果见表1。

张士英石英正长岩具有高硅、高碱特征。从表1中可以

看出样品 SiO_2 含量变化范围为 $57.81\% \sim 68.10\%$ 大多集中在中性岩范围。 $\text{Mg}^\#$ 变化范围在 $12.9 \sim 39.4$, 富碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量为 $9.03\% \sim 10.97\%$)。里特曼指数 σ 变化范围为 $3.46 \sim 8.04$, 平均值为 5.01 , 属于碱性岩系列。除去烧失量, 重新换算为 100% , 在TAS分类图解上样品点均落入碱性系列正长岩范围(图2a)。A.R. 变化范围在 $2.66 \sim 3.99$, 在A.R.- SiO_2 关系图解上均落入碱性系列(图2b)。 K_2O 变化范围在 $4.40\% \sim 6.37\%$ 。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$ 。在 SiO_2 - K_2O 图解上所有样品均落入橄榄玄粗岩系列。(图2c)。样品的 Al_2O_3 的含量变化范围在 $15.27 \sim 18.17$, 铝饱和指数 $\text{A}/\text{CNK} = 1.26 \sim 1.58$, 均大于 1.0 , $\text{A}/\text{NK} = 1.63 \sim 1.79$ 。在 A/NK - A/CNK 图解(图2d)上所有样品都落入过铝质系列。以上表明张士英石英正长岩具有高钾、富碱、过铝质特征。

4.2 全岩微量元素及稀土元素特征

8个样品的微量元素及稀土元素分析数据具有很好的 consistency。稀土元素组成上, 石英正长岩岩体稀土配分形式呈现明显的右倾型(图3)。 $\Sigma\text{REE} = 246.1 \times 10^{-6} \sim 411.1 \times 10^{-6}$ 。

表1 张士英石英正长岩的全岩主量 (wt%) 与微量元素 ($\times 10^{-6}$) 组成

Table 1 Whole rock major element (wt%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) data for the Zhangshiyiq Quartz syenite

样品号	ZSY -H-1	ZSY -H-2	ZSY -H-3	ZSY -H-4	ZSY -H-5	ZSY -H-6	ZSY -H-7	ZSY -H-8	样品号	ZSY -H-1	ZSY -H-2	ZSY -H-3	ZSY -H-4	ZSY -H-5	ZSY -H-6	ZSY -H-7	ZSY -H-8
SiO ₂	68.10	59.68	59.49	60.26	57.81	65.95	66.31	66.22	Ho	0.49	0.68	0.85	0.85	0.71	0.60	0.52	0.56
Al ₂ O ₃	15.27	18.17	16.15	15.91	17.76	15.39	15.64	15.63	Er	1.42	2.08	2.33	2.33	1.98	1.86	1.55	1.60
FeO ^T	2.67	5.16	6.15	5.41	8.25	3.37	4.02	3.09	Tm	0.20	0.28	0.32	0.31	0.25	0.26	0.23	0.22
CaO	1.39	1.15	3.76	2.97	0.44	1.94	0.52	1.69	Yb	1.46	2.02	1.96	2.06	1.63	1.77	1.62	1.53
MgO	0.70	1.29	2.22	1.70	0.68	0.86	0.67	0.90	Lu	0.22	0.32	0.31	0.31	0.29	0.27	0.27	0.25
Na ₂ O	4.31	4.60	4.63	4.32	4.72	4.17	3.92	4.39	ΣREE	246.1	347.2	391.4	411.1	331.5	301.3	263.1	273.9
K ₂ O	5.01	6.37	4.40	5.08	6.19	5.07	5.49	5.03	LREE	234.5	330.3	370.4	390.0	315.1	286.3	251.2	260.4
TiO ₂	0.34	0.57	0.93	0.80	0.54	0.50	0.52	0.44	HREE	11.6	16.9	21.0	21.1	16.4	15.1	11.9	13.3
MnO	0.06	0.24	0.17	0.13	0.17	0.08	0.05	0.06	LREE/HREE	20.2	19.5	17.6	18.5	19.2	19.1	21.1	19.6
P ₂ O ₅	0.17	0.27	0.66	0.57	0.27	0.25	0.25	0.22	(La/Sm) _N	9.00	8.65	6.42	7.43	8.33	8.24	9.94	8.55
SrO	0.07	0.06	0.09	0.08	0.04	0.08	0.06	0.08	(La/Yb) _N	21.1	19.7	15.5	16.7	17.3	18.6	20.6	19.7
BaO	0.15	0.19	0.21	0.18	0.17	0.18	0.17	0.18	δEu	0.70	0.74	0.60	0.54	0.99	0.72	0.66	0.73
LOI	0.69	2.09	1.00	0.99	1.50	1.38	1.36	0.77	δCe	0.90	0.88	0.88	0.89	0.95	0.92	1.21	0.90
Total	98.93	99.84	99.87	98.40	98.54	99.21	98.97	98.70	Rb	185.5	256.0	150.5	197.0	249.0	194.0	213.0	181.0
σ	3.46	7.21	4.94	5.12	8.04	3.72	3.80	3.82	Ba	1310	1640	1710	1530	1530	1590	1450	1530
A. R	3.54	3.63	2.66	2.98	3.99	3.28	3.79	3.38	Th	51.6	50.1	33.1	33.8	59.6	50.5	55.2	43.9
ALK	9.32	10.97	9.03	9.40	10.91	9.24	9.41	9.42	U	5.87	7.46	4.54	4.98	7.74	7.15	6.41	5.95
A/CNK	1.43	1.50	1.26	1.29	1.56	1.38	1.58	1.41	Nb	28.7	36.1	30.0	31.1	41.0	35.3	35.5	30.2
A/NK	1.64	1.66	1.79	1.69	1.63	1.67	1.66	1.66	Ta	2.00	2.30	1.70	1.80	2.80	2.40	2.30	2.00
Mg [#]	32.1	31.0	39.4	36.1	12.9	31.5	23.1	34.4	Pb	33	56.00	30.00	31.00	109.00	47.00	39.00	27.00
La	69.6	97.3	102.0	111.0	88.8	81.4	65.3	76.0	Sr	553	471	790	682	377	626	468	666
Ce	113.0	156.5	171.5	183.5	155.0	139.5	141.0	125.5	Nd	34.5	51.0	65.0	64.7	46.9	43.3	29.8	38.9
Pr	11.3	16.4	19.7	19.5	15.2	14.2	9.8	12.8	Zr	228	293	305	387	318	288	311	269
Nd	34.5	51.0	65.0	64.7	46.9	43.3	29.8	38.9	Hf	6.90	8.40	8.00	10.00	9.50	8.30	8.80	7.90
Sm	4.99	7.26	10.25	9.64	6.88	6.38	4.24	5.74	Y	13.1	18.7	21.6	22.1	18.8	16.6	13.4	14.7
Eu	1.14	1.78	1.97	1.70	2.26	1.50	0.96	1.39	Nb/Ta	14.4	15.7	17.6	17.3	14.6	14.7	15.4	15.1
Gd	4.8	7.3	9.6	9.6	6.9	6.3	4.6	5.8	Nb/U	4.89	4.84	6.61	6.24	5.30	4.94	5.54	5.08
Tb	0.52	0.78	1.04	1.05	0.81	0.69	0.50	0.61	Ce/Pb	3.42	2.79	5.72	5.92	1.42	2.97	3.62	4.65
Dy	2.46	3.48	4.59	4.61	3.82	3.29	2.62	2.73	Rb/Nb	6.46	7.09	5.02	6.33	6.07	5.50	6.00	5.99

注: FeO^T 为全铁, ALK = Na₂O + K₂O; AKI = (Na₂O + K₂O) / Al₂O₃; A/NKC = Al₂O₃ / (Na₂O + K₂O + CaO); Mg[#] = 100 × MgO / (MgO + FeO)

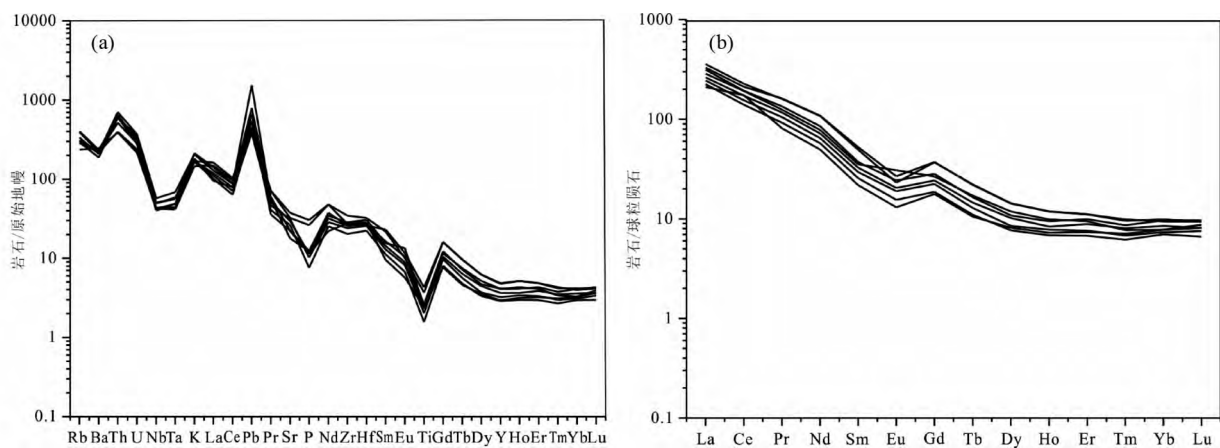


图3 张士英石英正长岩的原始地幔标准化微量元素蛛网图 (a) 和球粒陨石标准化稀土元素配分图 (b) (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 3 Primitive mantle-normalized trace elements patterns (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of Zhangshiyiq quartz syenite (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

表2 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of the Zhangshiying quartz syenite

测点号	元素 ($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)			
	Pb	Th	U		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ
ZSY-D-1-01	15	613	602	1.02	0.04677	0.00419	0.12208	0.01191	0.01840	0.00037	117	11	118	2
ZSY-D-1-02	14	447	586	0.76	0.04722	0.00468	0.11431	0.01107	0.01746	0.00039	110	10	112	2
ZSY-D-1-03	16	627	600	1.05	0.04416	0.00400	0.11861	0.01088	0.01902	0.00042	114	10	121	3
ZSY-D-1-04	12	410	443	0.93	0.04344	0.00442	0.11745	0.01233	0.01922	0.00049	113	11	123	3
ZSY-D-1-05	14	495	542	0.91	0.03903	0.00422	0.10430	0.01118	0.01884	0.00047	101	10	120.3	3
ZSY-D-1-06	12	449	489	0.92	0.04707	0.00470	0.12004	0.01194	0.01799	0.00039	115	11	115.0	2
ZSY-D-1-07	20	1460	592	2.47	0.04844	0.00440	0.13439	0.01260	0.01933	0.00047	128	11	123.4	3
ZSY-D-1-08	16	638	632	1.01	0.04772	0.00404	0.12877	0.01076	0.01913	0.00035	123	10	122.2	2
ZSY-D-1-09	8	228	310	0.73	0.04881	0.00789	0.12870	0.02132	0.01929	0.00046	123	19	123.2	3
ZSY-D-1-10	16	558	616	0.91	0.04616	0.00484	0.12456	0.01354	0.01928	0.00039	119	12	123.1	2
ZSY-D-1-11	13	414	484	0.86	0.06122	0.00584	0.16195	0.01523	0.01944	0.00049	152	13	124.1	3
ZSY-D-1-12	13	484	541	0.89	0.04713	0.00439	0.12342	0.01211	0.01846	0.00041	118	11	117.9	3
ZSY-D-1-13	13	423	489	0.87	0.04865	0.00421	0.13247	0.01142	0.01978	0.00040	126	10	126.3	3
ZSY-D-1-14	16	575	599	0.96	0.05133	0.00429	0.13909	0.01186	0.01956	0.00044	132	11	124.9	3
ZSY-D-1-15	23	899	848	1.06	0.05193	0.00408	0.14305	0.01116	0.01985	0.00038	136	10	126.7	2
ZSY-D-1-16	14	522	562	0.93	0.05222	0.00499	0.13630	0.01322	0.01900	0.00040	130	12	121.3	3
ZSY-D-1-17	12	422	458	0.92	0.04806	0.00456	0.13351	0.01217	0.02026	0.00049	127	11	129.3	3
ZSY-D-1-18	16	689	602	1.14	0.04966	0.00430	0.12867	0.01125	0.01910	0.00042	123	10	121.9	3
ZSY-D-1-19	15	523	573	0.91	0.04413	0.00463	0.11815	0.01243	0.01960	0.00040	113	11	125.1	3
ZSY-D-1-20	15	567	578	0.98	0.04336	0.00417	0.11939	0.01177	0.01991	0.00044	115	11	127.1	3
ZSY-D-1-21	13	480	525	0.91	0.04994	0.00512	0.13225	0.01297	0.01968	0.00048	126	12	125.7	3
ZSY-D-1-22	13	498	483	1.03	0.04867	0.00484	0.13016	0.01293	0.01953	0.00046	124	12	124.7	3
ZSY-D-1-23	17	675	640	1.05	0.04926	0.00472	0.12765	0.01180	0.01909	0.00039	122	11	121.9	2
ZSY-D-1-24	17	642	632	1.02	0.05148	0.00535	0.13966	0.01410	0.01948	0.00042	133	13	124.4	3

轻稀土富集,重稀土亏损, $LREE/HREE = 18.51 \sim 21.11$, 具有高的 $(La/Yb)_N$ 比为 $15.48 \sim 21.12$ 。Eu 呈弱的负异常, $\delta Eu = 0.54 \sim 0.99$ 指示岩浆源区残留斜长石或者在结晶过程中有斜长石的分异。在微量元素原始地幔标准化图上相对亏损 P 和 Ti, 这可能与成岩过程中磷灰石、钛铁矿等矿物的分离结晶有关或者部分熔融过程中作为源区残留相。高场强元素 Nb、Ta 亏损。大离子亲石元素 Rb、K、Th、U 富集。Pb 表现出正的异常, Ba 相对于 Rb 和 Th 呈现亏损特征。Sr 表现为负的异常这一点与 Eu 的负异常相一致, 都指示了斜长石作为源区的残留或者在岩浆演化早期结晶分异出去。

4.3 锆石 U-Pb 年龄

对样品进行了 24 个点的锆石 U-Pb 年龄测定, 定年结果见表 2。所测样品中的锆石形貌上多呈现规则的短柱状。锆石 CL 图像显示内部结构清晰, 发育有典型的岩浆振荡环带。不具有核幔结构可判断为岩浆形成后一次结晶形成, 所以所测的锆石年龄可以代表冷却及岩体侵位的年龄。Th/U 比除 7 号点较高 (2.47) 其它均大于 0.4, 变化范围在 0.76 ~ 1.14 之间。锆石的稀土总含量高, HREE 逐步富集, 具有明显的 Eu 负异常和 Ce 的正异常 (图 4)。以上特征均表明其为岩浆成因的锆石 (Hoskin 2000; Sun *et al.*, 2002; Wu and Zheng,

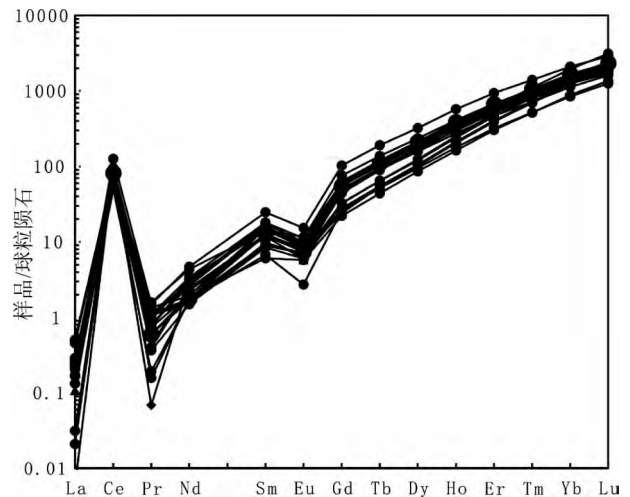


图4 张士英岩体的锆石稀土元素球粒陨石标准化图 (球粒陨石值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns of zircon grains of Zhangshiying plutons (chondrite values after Sun and McDonough, 1989)

2004)。

通过铅校正后的张士英石英正长岩的锆石的 U-Pb 年龄

表3 张士英岩体的锆石 Hf 同位素组成

Table 3 Zircon Hf isotope data for the Zhangshiyong quartz syenite

测点号	t (Ma)	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM1} (Ma)	t_{DM2} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
ZSY-D-1-1	118	0.282278	0.020098	0.000592	-15.9	1429	1821	-0.98
ZSY-D-1-2	112	0.282288	0.021265	0.000634	-15.7	1416	1804	-0.98
ZSY-D-1-3	121	0.282298	0.027302	0.000798	-15.2	1409	1785	-0.98
ZSY-D-1-4	123	0.282286	0.019404	0.000587	-15.5	1417	1804	-0.98
ZSY-D-1-5	120	0.282305	0.021473	0.000648	-14.9	1394	1772	-0.98
ZSY-D-1-6	115	0.282573	0.064039	0.001844	-5.7	1055	1296	-0.94
ZSY-D-1-7	123	0.282276	0.023296	0.000700	-15.9	1436	1824	-0.98
ZSY-D-1-8	122	0.282266	0.024545	0.000758	-16.3	1451	1841	-0.98
ZSY-D-1-9	123	0.282227	0.019475	0.000616	-17.6	1499	1910	-0.98
ZSY-D-1-10	123	0.282229	0.020828	0.000704	-17.5	1500	1907	-0.98
ZSY-D-1-11	124	0.282297	0.025251	0.000727	-15.1	1407	1785	-0.98
ZSY-D-1-12	118	0.282261	0.024322	0.000734	-16.5	1458	1852	-0.98
ZSY-D-1-13	126	0.282256	0.023431	0.000812	-16.5	1467	1858	-0.98
ZSY-D-1-14	125	0.282331	0.027807	0.000807	-13.9	1364	1725	-0.98
ZSY-D-1-15	127	0.282299	0.023931	0.000728	-15.0	1404	1780	-0.98
ZSY-D-1-16	121	0.282285	0.022389	0.000664	-15.6	1421	1807	-0.98
ZSY-D-1-17	129	0.282298	0.023002	0.000767	-15.0	1407	1782	-0.98
ZSY-D-1-18	122	0.282264	0.023017	0.000747	-16.4	1454	1846	-0.98
ZSY-D-1-19	125	0.282318	0.033476	0.001005	-14.4	1389	1749	-0.97
ZSY-D-1-20	127	0.282325	0.024953	0.000804	-14.1	1371	1735	-0.98
ZSY-D-1-21	126	0.282301	0.025223	0.000836	-14.9	1405	1778	-0.97
ZSY-D-1-22	125	0.282304	0.032383	0.001095	-14.9	1411	1774	-0.97
ZSY-D-1-23	122	0.282251	0.021594	0.000694	-16.8	1469	1868	-0.98
ZSY-D-1-24	124	0.282292	0.024425	0.000829	-15.3	1418	1794	-0.98

列于表 2, 对于小于 1Ga 的年轻样品, 锆石年龄采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比较合适 (Compston *et al.*, 1992)。在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上(图 5) 24 个数据点均集中在谐和线上或在其附近, 谐和度在 95% 以上, 获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $122.8 \pm 1.5\text{Ma}$ (MSWD = 1.6)。这一特征指示被测锆石未遭受明显的后期热事件影响, 得到的年龄可代表该岩体形成年龄。

4.4 锆石 Hf 同位素

石英正长岩的锆石 Hf 同位素分析结果见表 3。石英正长岩的 24 个锆石的测点的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 比值范围分别 0.019404 ~ 0.064039, 而 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 变化范围在 0.000587 ~ 0.001844, 所有锆石颗粒的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值均小于 0.002, 表明这些锆石在形成以后仅具有较少的放射成因 Hf 的积累, 因而可以用样品 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值代表锆石形成时的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值 (吴福元等, 2007)。 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 变化范围在 -0.98 ~ -0.94, 明显小于镁铁质地壳的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ (-0.34) 和硅铝质地壳的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ (-0.72) (Vervoort and Jonathan, 1996)。因此二阶段模式年龄更能反映其源区从亏损地幔被抽取出来的时间 (或其源区物质在地壳的平均存留年龄)。根据 Hf 同位素相关计算公式 (吴福元等, 2007), 采用硅铝质大陆地壳的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 计算了岩体的初始 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 、 t_{DM1} 和 t_{DM2} 。所有锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 变化范围在 0.282227 ~ 0.282573。根据各个锆石对应

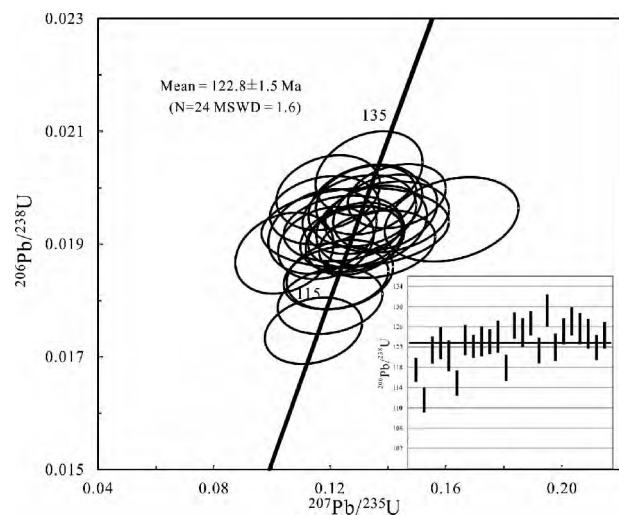


图5 张士英石英正长岩的锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 The zircon concordia diagrams for the Zhangshiyong quartz syenite

的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄计算得到它们的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 除 6 号测点为 -5.7 偏高外大部分集中于 -17.6 ~ -13.9, 平均值为 -15.2。单阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM1}) 除 6 号测点为 1.1Ga 外, 主要变化范围在 1.36 ~ 1.5Ga, 平均为 1.41Ga。两阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM2}) 除 6 号测点为 1.3Ga 外, 主要变化范围在 1.73 ~

1.91Ga, 平均为 1.79Ga。

5 讨论

5.1 岩体形成时代

关于张士英岩体的形成时代存在较大的争议,前人做过大量工作得到 3 组不同的年龄数据:(1)采用岩体内不同岩性岩石获得全岩的 Rb-Sr 等时线年龄为 $133.4 \pm 0.5\text{Ma}$ (张正伟等, 2000); (2) 向君峰等(2010) 等对张士英岩体进行了锆石 SHRIMP U-Pb 测年,结果显示钾长花岗岩、似斑状花岗岩和石英斑岩的结晶年龄分别是 $107.3 \pm 2.4\text{Ma}$ 、 $106.7 \pm 2.5\text{Ma}$ 和 $101 \pm 3\text{Ma}$ 。因此认为张士英岩体形成于 $110 \sim 100\text{Ma}$ 。(3) 李创举和包志伟(2010) 通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年得到的年龄结果为 $124.2 \pm 0.5\text{Ma}$ 。由于 Rb-Sr 法测年的自身局限性即封闭温度低很容易受到后期的变质作用的影响,因此定年的结果不如锆石 U-Pb 测年结果可靠。本文通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,得到岩体形成年龄为 $122.8 \pm 1.5\text{Ma}$, 结果与李创举和包志伟(2010) 得到的年龄结果在误差范围内一致。此外刘振宏等(2004) 将华北南缘燕山期形成的岩体自南向北划分了三个带。张士英岩体位于北部的太山庙-叶庄-角子山花岗岩带,并测得黑云母 K-Ar 年龄为 $121 \sim 123\text{Ma}$, 这个年龄也与本文得到的年龄相一致。研究区西南方向还存在侵位于汝阳群和新元古代花岗岩中的祖师顶和角子山岩体,岩体的主体岩性为黑云母二长花岗岩,周红升等(2008) 对这两个岩体采用 LA-ICP-MS U-Pb 定年获得了 131.9Ma 和 120.9Ma 的年龄。祖师顶、角子山和张士英石英正长岩形成时代相一致,都是燕山期岩浆活动的产物。因此笔者认为张士英岩体至少在早白垩世晚期(123Ma 左右) 就开始了岩浆活动。结合向君峰等(2010) 获得的 $110 \sim 100\text{Ma}$ 较年轻的岩石年龄,笔者认为张士英岩体至少存在两期的岩浆活动。本文的石英正长岩样品是早期岩浆活动(122.8Ma 左右) 的产物。

5.2 全岩的锆饱和温度

Watson and Harrison(1983) 研究发现锆石中 Zr 的分配系数对温度极为敏感而受其他因素影响较小,并实验得到了温度与全岩锆含量和主要元素含量之间的关系。目前全岩的锆饱和温度计是当前获取初始岩浆温度的主要方法之一。用公式来计算锆石结晶时岩浆的温度,其中 $M = [(Na + K + 2Ca) / (Al \times Si)] Zr_{\text{melt}}$ 为全岩的锆含量。Miller *et al.* (2003) 根据锆石的饱和温度,提出热(hot)和冷(cold)花岗岩的概念。热(hot)花岗岩中继承锆石含量少,形成温度集中在 837°C ($>800^\circ\text{C}$), 其形成过程可能有外来热的加入。而冷(cold)花岗岩富含继承锆石,形成温度集中在 766°C ($<800^\circ\text{C}$), 其形成过程主要与流体相的加入有关。计算得到张士英石英正长岩的岩浆温度为 $940 \sim 1000^\circ\text{C}$ 。计算结果表明形成岩体的岩浆温度较高。张士英石英正长岩具有热

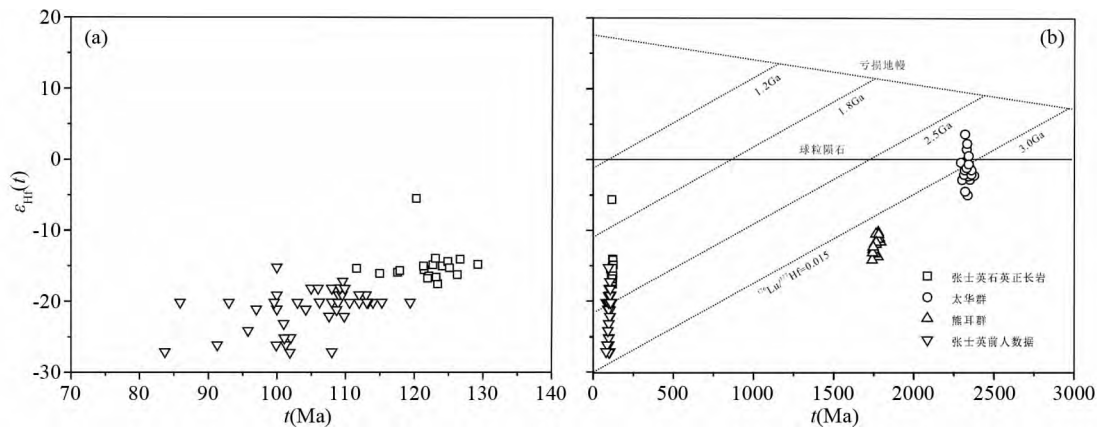
(hot) 花岗岩性质,外来热源的加入使石英正长岩具有较高的形成温度,而幔源岩浆的上涌可能为其外来热源。

5.3 岩浆源区及成因

岩石具有高 K ($K_2O = 4.40\% \sim 6.37\%$) 特征,并且 K_2O 含量与 SiO_2 含量不存在相关性,表明高 K 为岩浆源区固有特征。 $Mg^\#$ 可以很好地区分幔源组分是否参与壳源岩浆作用 (Smithies, 2000)。大洋中脊玄武岩(MORB) 的 $Mg^\#$ 在 60 左右,玄武质下地壳部分熔融产生的熔体,无论熔融程度高低其 $Mg^\#$ 都不会高于 40,但当地幔物质参与成岩时 $Mg^\#$ 会增高,研究表明岩浆混染 10% 的地幔橄榄岩 $Mg^\#$ 值从 44 提高到 55 (Rapp *et al.*, 1999)。张士英石英正长岩的 $Mg^\#$ 变化范围在 $12.9 \sim 39.4$, 变化范围较大但总体显示为壳源岩浆成因。石英正长岩具有与壳源岩石相似的微量元素特征,如富集大离子元素 (Rb、K 和 Pb) 和轻稀土元素,亏损高场强元素,指示石英正长岩应属地壳来源。Rb/Nb 比值变化范围为 $5.50 \sim 7.09$, 高于大陆地壳值 ($2.2 \sim 4.7$) 也指示了陆壳物质对成岩影响大导致 Rb 含量的增加 (Sylvester, 1989)。Nb/U 比值因其不随源区部分熔融或者分离结晶作用而改变,因此可以很好地反映岩浆源区 (Sun *et al.*, 2008; Hofmann, 1988)。张士英岩体的 Nb/U 变化范围在 $4.84 \sim 6.61$, 相似于大陆地壳的平均值,大陆地壳 Nb/U 平均值约为 6.2 (Rudnick and Fountain, 1995)。Ce/Pb 值变化范围在 $1.42 \sim 5.92$ 也相似于大陆地壳的平均值 (Ce/Pb = 3.9) (Rudnick and Fountain, 1995)。以上均表明岩体成岩物质主要来自地壳。

结合前人对该地区进行的 Sr-Nd-Pb 研究结果,根据最新测得的锆石 U-Pb 年龄 $122.8 \pm 1.5\text{Ma}$, 对 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素数据进行了重新计算。结果显示张士英石英正长岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i = 0.709 ± 0.03 , $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -21.5 \sim -15.8$ 。较高的初始 Sr 同位素组成和较低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值表明岩体主要来自于古老地壳物质的部分熔融。岩体相对贫放射成因的铅, Pb 同位素特征 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.14 \sim 17.24$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.41 \sim 15.62$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.86 \sim 38.60$) 也表明岩体来源于地壳物质的部分熔融 (张正伟等, 2002; 李创举和包志伟, 2010)。Hf 同位素研究表明 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) < 0$ 的岩石为古老下地壳部分熔融而形成,在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) - t$ 图解 (图 6) 上, 这些锆石的 Hf 同位素位于元古宙地壳演化范围内, 推测为古老下地壳物质再熔融的产物。

秦岭造山带经历了多阶段的演化拼合历史,前已论述张士英岩体区域出露了多种古老地壳物质,包括华北陆块南缘的太华群、熊耳群、汝阳群和北秦岭微陆块及其以南的古老地壳物质,这些古老岩石都有可能为其源区物质。前人曾测得张士英岩体的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} < 17.8$, 并计算得到的铅同位素矢量特征值 $V_2 < 14$ (张正伟等, 2002)。而华北陆块相比于扬子陆块具有低放射成因铅同位素组成 (张宏飞等, 2005), 因此可以排除北秦岭微陆块及以南的岩石为其源区。太华

图6 张士英岩体锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) - t$ 图解

(a) 张士英岩体 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) - t$ 图解; (b) 张士英岩体与部分基底锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) - t$ 图解. 太华群引自第五春荣等, 2007; 熊耳群引自 Wang *et al.*, 2010; 张士英前人数据引自向君峰等, 2010

Fig. 6 Diagram of $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) - t$ of zircon from the Zhangshiyong pluton

(a) $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) - t$ diagram of the Zhangshiyong pluton; (b) $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) - t$ diagram of the Zhangshiyong pluton and regional basement. Data of Taihua Group are derived from Diwu *et al.*, 2007; data of the Xionger Group are derived from Wang *et al.*, 2010; some data of the Zhangshiyong pluton are derived from Xiang *et al.*, 2010

群可以代表华北陆块南缘新太古代时期的下地壳, 多种同位素年龄显示形成于 2.3 Ga, 明显大于本文所测的张士英石英正长岩锆石 Hf 同位素两阶段模式年龄 (1.73 ~ 1.91 Ga)。在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) - t$ 图上 (图 6b) 可以看出张士英石英正长岩位于太华群 Hf 同位素演化线之上, 所以张士英石英正长岩不可能单纯的由太华群部分熔融形成, 必须还有较高 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的物质加入。并且根据太华群 Nd 同位素组成 (张本仁等, 2002) 计算到张士英岩体形成 (122.8 Ma) 时的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值分别为 -24, 该值远小于张士英石英正长岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (-21.5 ~ -15.8)。但是张士英岩体后期岩浆活动 (110 ~ 100 Ma) 产生的钾长花岗岩、似斑状花岗岩和石英斑岩 (向君峰等, 2010) 正好落在太华群演化线上。因此张士英后期岩浆活动是太华群部分熔融的产物。熊耳群为华北陆块南缘中元古代火山岩, 最新锆石 U-Pb 年龄显示为 1.76 Ga (Wang *et al.*, 2010) 与本文所测的张士英岩体锆石 Hf 两阶段模式年龄 (1.73 ~ 1.91 Ga) 相当。但是根据熊耳群 Nd 同位素数据和锆石 Hf 同位素数据 (Wang *et al.*, 2010) 分别计算到张士英岩体形成时 ($t = 122.8 \text{ Ma}$) 的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围分别是: -29.8 ~ -26.6、-49.4 ~ -46.1。其值却远小于张士英岩体的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-21.5 ~ -15.8) 值和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ (-13.9 ~ -5.7) 值, 在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) - t$ 图上 (图 6b) 可以看到张士英石英正长岩位于熊耳群演化线之上。所以张士英早期岩浆活动形成的石英正长岩也不可能单纯的由熊耳群部分熔融形成, 应还有较高 ε_{Hf} 的物质平衡。6 号测点较高 (-5.7) 的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值也表明存在较高 ε_{Hf} 值的物质参与了张士英早期的岩浆活动。而关于这种较高 ε_{Hf} 的物质存在初生陆壳和地幔物质这两种争议 (李剑举和包志伟, 2010; 向君峰等, 2010)。前人曾对华北克拉通地壳岩石的 Nd 模式年龄进行统计, 发现存在

2.8 ~ 2.5 Ga 和 2.2 ~ 1.8 Ga 两个峰期, 因此提出华北克拉通 2.2 ~ 1.8 Ga 时期存在一次陆壳增生 (张宗清等, 2002; 张本仁等, 2002)。这一年龄与前寒武纪岩石圈地幔 Re-Os 等时线年龄 (1.9 Ga) 相一致 (高山等, 2003), 表明前寒武纪岩石圈地幔与大陆地壳增长是耦合的, 因此也认为中元古代华北存在一次陆壳增生事件。近年来随着测试技术的不断进步以及数据的不断增加, 华北前寒武纪陆壳增生有了更新的认识。有学者统计了华北克拉通大量的锆石数据发现锆石年龄主要分布在 2.4 ~ 2.6 Ga, 1.7 ~ 1.9 Ga 和晚古生代三个阶段。2.5 Ga 的锆石 ε_{Hf} 具有正值, 指示了该阶段大量初始陆壳的形成。但是 1.9 ~ 1.7 Ga 期间的岩浆岩中的锆石具有负的 ε_{Hf} 值, 代表的是古老地壳物质的重熔 (Geng *et al.*, 2012; Zhu *et al.*, 2014)。因此华北克拉通前寒武纪陆壳增生主要发生在太古代, 而 1.9 ~ 1.7 Ga 锆石年龄指示的是一次构造热事件。因此笔者更倾向于第二种观点即这种较高 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的物质是地幔物质。因此张士英早期岩浆活动形成的石英正长岩的源区主要是太华群和熊耳群, 并且源区还有少量幔源物质的贡献。而后期岩浆活动 (110 ~ 100 Ma) 主要是太华群部分熔融的结果。

前人对正长岩类岩石的成因进行过大量的研究提出过多种模式, 概括起来主要有以下三种: (1) 壳源部分熔融: 下地壳物质在高温高压下低程度部分熔融形成 (Huang and Wyllie, 1981; Tchameni *et al.*, 2001); (2) 幔源物质部分熔融: 认为正长岩由富集岩石圈地幔部分熔融 (Yang *et al.*, 2005; Kumar *et al.*, 2007; He *et al.*, 2009) 或者由碱性玄武岩岩浆结晶分异的产物 (Brown and Becker, 1986); (3) 壳幔岩浆混合成因: 主要是由硅不饱和的幔源镁铁质岩浆和其上升过程中诱发地壳物质熔融形成的长英质岩浆混合并经过进

一步的结晶分异形成 (Mingram *et al.*, 2000; Litvinovsky *et al.*, 2002; Harris *et al.*, 1999)。

结合本文的研究工作, 张士英早期岩浆活动产生的石英正长岩比古老下地壳的基底岩石太华群、熊耳群具有较高的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 及初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 。在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图解上位于古老基底和球粒陨石演化线之间(图6), 表明形成岩体时可能有少量年轻地幔物质的参与。较高的锆石饱和温度也支持幔源岩浆为岩体提供热源。结合主微量、同位素特征并区域地质背景提出: 张士英石英正长岩支持第一种成因观点即岩体是古老下地壳物质在高温高压下低程度部分熔融形成的。关于下地壳物质部分熔融, 目前主要有两种机制: (1) 幔源的高温玄武质岩浆底侵下地壳, 为下地壳部分熔融提供热源 (Fan *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2002)。(2) 下地壳和岩石圈一起拆沉进入软流圈地幔发生部分熔融(吴福元等, 2003; 邓晋福等, 1994)。两种成因机制会造成不同的 $\text{Mg}^\#$ 值。岩浆底侵的成因模式不会造成 $\text{Mg}^\#$ 的升高, 但是拆沉模式形成的岩浆在上升过程中会与上覆地幔橄榄岩发生混合导致 $\text{Mg}^\#$ 的升高(许继峰和王强, 2003)。张士英早期岩浆活动形成的石英正长岩较低的 $\text{Mg}^\#$ 值, 显示其岩体部分熔融的机制是幔源玄武质岩浆底侵。因此张士英早期岩浆活动形成的石英正长岩是幔源岩浆发生底侵作用导致地壳物质发生部分熔融形成的岩浆经结晶分异作用形成。在其形成过程中有少量幔源物质的加入, 幔源岩浆不仅为早期形成的岩浆提供了热量而且还提供了物质。而晚期岩浆主要是太华群部分熔融的结果, 且晚期岩浆相对于早期具有更加负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(图6a)。

5.4 构造意义

前人研究表明, 碱性岩通常产生于碰撞造山作用之后、板内裂谷或者伸展构造背景下。并且能够很好地指示大陆岩石圈相互作用和岩浆演化过程 (Bonin, 2007; Yang *et al.*, 2005)。张士英岩体主要为石英正长岩属于碱性岩范畴。因此断定华北克拉通南缘早白垩世时期形成的张士英岩体受岩石圈伸展的构造背景控制。岩石圈伸展导致幔源的上涌, 为下地壳物质部分熔融提供了充足的热源和少量的物质。

那么这种岩石圈的伸展机制又是什么? 结合区域地质背景, 研究区毗邻秦岭造山带, 很有可能受到秦岭造山带演化的影响。华北克拉通自加里东运动开始直到三叠纪早期一直处于稳定发展阶段, 扬子克拉通与华北克拉通在 238 ~ 218Ma 之间实现碰撞对接 (李曙光等, 1989; Meng *et al.*, 1999)。直到中侏罗世晚期完成全面的拼合, 岩石圈在 150Ma 前后厚度达到最大 (毛景文等, 2005)。其后岩石圈开始拉张趋于减薄, 并诱发了中国东部晚中生代大规模的岩浆活动和成矿作用 (Li and Li, 2007; Wu *et al.*, 2005; 毛景文等, 2005)。中生代时中国大陆中东部的区域构造体制经历了从古生代 EW 向构造格局转变到中生代早期的 NNE 向构造格局。并提出构造体制转折始于 150 ~ 140Ma, 终于 110

~ 100Ma, 峰期是 120 ~ 110Ma (翟明国等, 2004; 王涛等, 2007)。华北克拉通及其邻区大规模成矿作用也主要出现在中生代, 集中分布于 3 个时期: 200 ~ 160Ma、140Ma 左右和 130 ~ 110Ma。三大成矿期所对应的地球动力学背景分别为华北板块与扬子板块的碰撞造山后陆内造山和伸展过程; 南北主应力场向东西主应力场构造体制大转时期(并认为 163 ~ 136Ma 是地球动力调整的时间段); 东西向岩石圈大规模减薄作用的时间是 130 ~ 110Ma (120Ma 为峰期) (毛景文等, 2005)。三次成矿作用也和华北南缘发育的大量中酸性侵入时代具有很好的一致性。最近 Mao *et al.* (2011) 基于对辉钼矿的 Re/Os 年龄, 对东秦岭-大别造山带的 29 个钼矿床统计发现钼矿成矿时代集中分布于晚三叠纪 (233 ~ 221Ma)、晚侏罗世到早白垩世 (148 ~ 138Ma)、早-中白垩世 (131 ~ 112Ma) 三个时期。华北克拉通边缘的金矿成矿作用也局限在很短的时间内, 主要发生在早白垩世 (130 ~ 110Ma) (Yang *et al.*, 2003)。中国东部广泛分布的中生代花岗岩, 成岩作用也主要在早白垩世, 年龄变化范围在 131 ~ 117Ma (Wu *et al.*, 2005)。以上表明早白垩世华北克拉通岩浆活动和成矿作用异常活跃。张士英石英正长岩形成于 123Ma 左右, 形成时代与构造体系大转折以及华北克拉通及其边缘大规模成岩成矿作用具有很好的一致性, 而华北克拉通中生代大规模成岩成矿活动被证实为克拉通破坏的响应。

华北克拉通太古宙岩石圈地幔在中-新生代发生了强烈的破坏和减薄这已成为地学界不争的事实 (Xu, 2001; Gao *et al.*, 2004; Yang *et al.*, 2008; 吴福元等, 2008)。华北克拉通浅部广泛发育的伸展构造包括拆离正断层、变质核杂岩、伸展盆地及大规模发育的岩浆岩等是区域伸展环境最直接的证据。华北南缘及邻区发育了大规模晚中生代变质核杂岩在 131 ~ 125Ma 存在一个快速冷却的过程, $A1$ 个黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年统计结果给出了 125Ma 的拆沉活动的高峰期 (Wang *et al.*, 2011; Cui *et al.*, 2012)。断陷盆地及拆离断层出现的高峰期在 145 ~ 115Ma 之间 (Zhu *et al.*, 2005; 林伟等, 2013)。此外华北广泛发育了早白垩世时期 (135 ~ 115Ma) 的岩浆活动峰期为 125Ma。并且具有不同来源、成因和侵位深度, 反映了这一时期强烈的深部地质过程 (Zhao *et al.*, 2012; Jian *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2005; 吴福元等, 2008)。华北克拉通东部岩石圈地幔的水含量大约从 125Ma 开始总体上高于 MORB 源区 ($50 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$) (Xia *et al.*, 2013), 而克拉通水化必然导致深部地幔其强度显著的降低。从而也证明了 125Ma 左右是华北克拉通破坏的高峰期。

通过以上分析表明 125Ma 左右是华北克拉通破坏的峰期, 这个年龄与翟明国等 (2004) 提出的构造体制 120 ~ 110Ma 转折峰期具有一致性以及与毛景文等 (2005) 提出的 130 ~ 110Ma 大规模成矿时代一致。张士英早期岩浆活动形成的石英正长岩结晶于 123Ma 左右, 正好位于华北克拉通破坏的峰期, 而 110 ~ 100Ma 的后期岩浆活动位于峰期之后。而破坏峰期时必然有更多幔源物质的上涌, 底侵下地壳并参

与岩浆形成过程。故此相比于晚期岩浆活动早期形成的石英正长岩具有相对较高的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(图 6a)。因此作者认为, 华北克拉通南缘的晚中生代张士英岩体形成于造山后期构造体制从挤压向伸展的转变阶段和之后的岩石圈大规模伸展环境, 这种构造体制的转折导致了岩石圈的减薄和华北克拉通的破坏。而构造转折的机制是受太平洋板块俯冲方向的转变的影响, 研究表明太平洋板块俯冲方向从 140 ~ 125Ma 的北东方向转变为 125 ~ 100Ma 的西北方向(Koppers *et al.*, 2001)。导致了华北构造体制由南北向的挤压转变为东西向的弧后拉张, 拉张性的构造环境导致了幔源岩浆的上涌, 炽热的幔源岩浆烘烤导致下地壳发生部分熔融形成原始岩浆, 并经过一系列的结晶分异在研究区侵位形成张士英石英正长岩体。在成岩过程中有少量的地幔物质的加入。

6 结论

(1) 张士英石英正长岩具有高硅、高钾、富碱和过铝质特征, SiO_2 (57.81% ~ 68.1%) 大多集中在中性岩范围 σ 变化范围为 3.46 ~ 8.04, 属于碱性岩。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$ 。铝饱和指数 A/CNK (1.26 ~ 1.58) 均大于 1。轻稀土富集, 重稀土亏损, Eu 呈弱的负异常, 亏损高场强元素 P、Ti、Nb、Ta, 富集大离子亲石元素 Rb、K、Th、U。

(2) 锆石 U-Pb 测年获得张士英岩体的年龄为 $122.8 \pm 1.5\text{Ma}$, 代表该岩体早期岩浆侵位年龄。锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -17.6 \sim -13.9$, Hf 两阶段模式年龄 $t_{\text{DM2}} = 1.7 \sim 1.9\text{Ga}$ 。指示岩体源区主要为古老下地壳, 可能为基底太华群和熊耳群在幔源玄武质岩浆底侵过程中发生部分熔融形成, 并可能有少量地幔组分的参与。

(3) 华北克拉通南缘的晚中生代张士英侵入岩形成于造山后期构造体制从挤压向伸展的转变阶段和之后的岩石圈大规模伸展环境, 这种构造体制的转折导致了岩石圈的减薄和华北克拉通的破坏。

致谢 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年得到中国科学技术大学赵乘乘的帮助, 锆石 Hf 同位素测试得到西北大学张红老师的帮助, 在此表示衷心感谢。感谢匿名审稿人对本文完善提出的宝贵意见及建议。

References

Black LP, Kamo SL, Allen CM, Aleinikoff JN, Davis DW, Korsch RJ and Foudoulis C. 2003. TEMORA: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 200(1-2): 155-170

Blichert TJ and 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

Brown PE and Becker SM. 1986. Fractionation, hybridisation and magma-mixing in the Kialineq centre East Greenland. *Contributions*

to Mineralogy and Petrology, 92(1): 57-70

Bonin B. 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects. *Lithos*, 97(1-2): 1-29

Chen YJ, Li C, Zhang J, Li Z and Wang HH. 2000. Sr and O isotopic characteristics of porphyries in the Qinling molybdenum deposit belt and their implication to genetic mechanism and type. *Science in China (Series D)*, 43(S1): 82-94

Compston W, Williams IS and Kirschvink JL. 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian timescale. *Journal of the Geological Society*, 149(2): 171-184

Cui JJ, Liu XC, Dong SW and Hu JM. 2012. U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar geochronology of the Tongbai complex, central China: Implications for Cretaceous exhumation and lateral extrusion of the Tongbai-Dabie HP/UHP terrane. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47: 155-170

De Bièvre P and Taylor PDP. 1993. Table of the isotopic compositions of the elements. *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes*, 123(2): 149-166

Deng JF, Mo XX, Zhao HL, Luo ZH and Du YS. 1994. Lithosphere root/de-rooting and activation of the East China continent. *Geoscience*, 8(3): 349-356 (in Chinese with English abstract)

Diwu CR, Sun Y, Lin CL, Liu XM and Wang HL. 2007. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes and their geological significance of Yiyang TTG gneisses from Henan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 253-262 (in Chinese with English abstract)

Fan WM, Guo F, Wang YJ, Lin G and Zhang M. 2001. Post-orogenic bimodal volcanism along the Sulu orogenic belt in eastern China. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(9-10): 733-746

Gao S, Rudnick RL, Carlson RW, McDonough WF and Liu YS. 2003. Removal of lithospheric mantle in the North China Craton: Re-Os isotopic evidence for coupled crust-mantle growth. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 61-67 (in Chinese with English abstract)

Gao S, Rudnick RL, Yuan HL, Liu XM, Liu YS, Xu WL and Wang QH. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432(7019): 892-897

Geng YS, Du LL and Ren LD. 2012. Growth and reworking of the Early Precambrian continental crust in the North China Craton: Constraints from zircon Hf isotopes. *Gondwana Research*, 21(2-3): 517-529

Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, van Achterbergh E, O'Reilly SY and Shee SR. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133-147

Griffin WL, Wang X, Jackson SE, Pearson NJ, O'Reilly SY, Xu XS and Zhou XM. 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

Harris C, Marsh JS and Milner SC. 1999. Petrology of the alkaline core of the Messum igneous complex, Namibia: Evidence for the progressively decreasing effect of crustal contamination. *Journal of Petrology*, 40(9): 1377-1397

He ZY, Xu XS, Yu Y and Zou HB. 2009. Origin of the Late Cretaceous syenite from Yandangshan, SE China, constrained by zircon U-Pb and Hf isotopes and geochemical data. *International Geology Review*, 51(6): 556-582

Hofmann AW. 1988. Chemical differentiation of the Earth: The relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(3): 297-314

Hoskin PWO. 2000. Patterns of chaos: Fractal statistics and the oscillatory chemistry of zircon. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(11): 1905-1923

Huang WL and Wyllie PJ. 1981. Phase relationships of S-type granite with H_2O to 35kbar: Muscovite granite from Harney Peak, South Dakota. *Journal of Geophysical Research*, 86(B11): 10515-10529

Jian P, Liu D, Kröner A, Windley BF, Shi YR, Zhang W, Zhang FQ, Miao LC, Zhang LQ and Tomurhuu D. 2010. Evolution of a Permian intraoceanic arc trench system in the Solonker suture zone, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia. *Lithos*, 118(1-2): 169

- 190

- Karmalkar NR, Rege S, Griffin WL and O'Reilly SY. 2005. Alkaline magmatism from Kutch, NW India: Implications for plume-lithosphere interaction. *Lithos*, 81(1-4): 101-119
- Koppers AA, Morgan JP, Morgan JW and Staudigel H. 2001. Testing the fixed hotspot hypothesis using $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age progressions along seamount trails. *Earth and Planetary Science Letters*, 185(3): 237-252
- Kumar KV, Frost CD, Frost BR and Chamberlain KR. 2007. The Chimakurti, Errakonda, and Uppalapadu plutons, Eastern Ghats Belt, India: An unusual association of tholeiitic and alkaline magmatism. *Lithos*, 97(1-2): 30-57
- Li CJ and Bao ZW. 2010. LA-ICPMS zircon U-Pb geochronology and geochemical characteristics of the Zhangshiyang syenite from south of Wuyang, Henan Province *Geotectonica et Metallogenia*, 34(3): 435-443 (in Chinese with English abstract)
- Li SG, Hart SR, Zheng SG, Guo AL, Liu DL and Zhang GW. 1989. The collision time of North China plate and South China plate: Evidence from Sm-Nd ages. *Science in China (Series B)*, 19(3): 312-319 (in Chinese)
- Li XZ, Yan Z and Lu XX. 1993. The Granites in Qinling-Dabie Mountains. Beijing: Geological Publishing House, 11-27 (in Chinese with English abstract)
- Li YF, Mao JW, Hu HB, Guo BJ and Bai FJ. 2005. Geology, distribution, types and tectonic settings of Mesozoic molybdenum deposits in East Qinling area. *Mineral Deposits*, 24(3): 292-304 (in Chinese with English abstract)
- Li ZX and Li XH. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35(2): 179-182
- Lin W, Wang J, Liu F, Ji WB and Wang QC. 2013. Late Mesozoic extension structures on the North China Craton and adjacent regions and its geodynamics. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5): 1791-1810 (in Chinese with English abstract)
- Litvinovsky BA, Jahn BM, Zanzhivich AN and Shadaev MG. 2002. Crystal fractionation in the petrogenesis of an alkali monzodioritesyenite series: The Oshurkovo plutonic sheeted complex, Transbaikalia, Russia. *Lithos*, 64(3): 97-130
- Liu DY, Wilde SA, Wang YS, Valley JW, Kita N, Dons CY, Xie HQ, Yang CX, Zhang YX and Cao LG. 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. *Chemical Geology*, 261(1): 140-154
- Liu YS, Hu ZC, Gao S, Güenther D, Xu J, Gao CG and Chen HH. 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
- Liu ZH, Wang SY, Zhang L, Yang CX, Wu TA and Cui XF. 2004. The Jurassic magmatism of intracratonic orogen in the southern margin of the North China Craton. *Geological Survey and Research*, 27(1): 35-42 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2003. User's manual for ISOPLOT3.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, No. 4: 1-70
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635-643
- Mao JW, Wang YT, Zhang ZH, Yu JJ and Niu BG. 2003. Geodynamic settings of Mesozoic large scale mineralization in North China and adjacent areas: Implication from the highly precise and accurate ages of metal deposits. *Science in China (Series D)*, 46(8): 838-851
- Mao JW, Xie GQ, Zhang ZH, Li XF, Wang YT, Zhang CQ and Li YF. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 169-188 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Xie GQ, Bierlein F, Qü WJ, Du AD, Ye HS and Yang ZQ. 2008. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(18): 4607-4626
- Mao JW, Pirajno F, Xiang JF, Gao JJ, Ye HS, Li YF and Guo BJ. 2011. Mesozoic molybdenum deposits in the east Qinling-Dabie orogenic belt: Characteristics tectonic settings. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 264-293
- Meng QR and Zhang GW. 1999. Timing of collision of the North and South China blocks: Controversy and reconciliation. *Geology*, 27(2): 123-126
- Middlemost EAK. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37(3-4): 215-224
- Miller CF, McDowell SM and Mapes RW. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. *Geology*, 31(6): 529-532
- Mingram B, Trumbull RB, Littman S and Gerstenberger H. 2000. A petrogenetic study of anorogenic felsic magmatism in the Cretaceous Paresis ring complex, Namibia: Evidence for mixing of crust and mantle-derived components. *Lithos*, 54(1-2): 1-22
- Peccerillo A and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63-81
- Rapp RP, Shimizu N, Norman MD and Applegate GS. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160(4): 335-356
- Ratschbacher L, Hacker BR, Calvert A, Webb LE, Grimmer JC, McWilliams MO, Ireland T, Dong SW and Hu JM. 2003. Tectonics of the Qinling (Central China): Tectonostratigraphy, geochronology, and deformation history. *Tectonophysics*, 366(1-2): 1-53
- Rudnick RL and Fountain DM. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective. *Reviews of Geophysics*, 33(3): 267-309
- Smithies RH. 2000. The Archaean tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite. *Earth and Planetary Science Letters*, 182(1): 115-125
- Söderlund U, Patchett JP, Vervoort JD and Isachsen CE. 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3-4): 311-324
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ. (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313-345
- Sun WD, Li SG, Chen YD and Li YJ. 2002. Timing of synorogenic granitoids in the South Qinling, central China: Constraints on the evolution of the Qinling-Dabie orogenic belt. *Journal of Geology*, 110(4): 457-468
- Sun WD, Hu YH, Kamenetsky VS, Eggins SM, Chen M and Arculus RJ. 2008. Constancy of Nb/U in the mantle revisited. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(14): 3542-3549
- Sylvester PJ. 1989. Post-collisional alkaline granites. *The Journal of Geology*, 261-280
- Tchameni R, Mezger K, Nsifa NE and Poulet A. 2001. Crustal origin of Early Proterozoic syenites in the Congo craton (Ntem complex), South Cameroon. *Lithos*, 57(1): 23-42
- Tu XL, Zhang H, Deng WF, Ling MX, Liang HY, Liu Y and Sun WD. 2011. Application of RESOLUTION in-situ laser ablation ICP-MS in trace element analyses. *Geochimica*, 40(1): 83-98 (in Chinese with English abstract)
- Vervoort JD and Jonathan PP. 1996. Behavior of hafnium and neodymium isotopes in the crust: Constraints from Precambrian crustally derived granites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(19): 3717-3733
- Wan YS, Song B, Liu DY, Wilde SA, Wu JS, Shi YR, Yin XY and Zhou HY. 2006. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidence for a major Late Palaeoproterozoic tectonothermal event. *Precambrian Research*, 149(3-4): 249-271
- Wang T, Wang XX, Zhang GW, Pei XZ and Zhang CL. 2003.

- Remnants of a Neoproterozoic collisional orogenic belt in the core of the Phanerozoic Qinling orogenic belt (China). *Gondwana Research*, 6(4): 699–710
- Wang T, Pei XZ, Wang XX, Hu NG, Li WP and Zhang GW. 2005. Orogen-parallel westward oblique uplift of the Qinling basement complex in the core of the Qinling orogen (China): An example of oblique extrusion of deep-seated metamorphic rocks in a collisional orogen. *The Journal of Geology*, 113(2): 181–200
- Wang T, Zheng YD, Zhang JJ, Wang XS, Zeng LS and Tong Y. 2007. Some problems in the study of Mesozoic extensional structure in the North China craton and its significance for the study of lithospheric thinning. *Geological Bulletin of China*, 26(9): 1154–1166 (in Chinese with English abstract)
- Wang T, Zheng YD, Zhang JJ, Zeng LS, Donskaya T, Guo L and Li JB. 2011. Pattern and kinematic polarity of Late Mesozoic extension in continental NE Asia: Perspectives from metamorphic core complexes. *Tectonics*, 30(6): 345–360
- Wang TH, Mao JW and Wang YB. 2008. Research on SHRIMP U-Pb chronology in Xiaoqinling-Xionger Shan area: The evidence of delamination of lithosphere in Qinling orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1273–1287 (in Chinese with English abstract)
- Wang XL, Jiang SY and Dai BZ. 2010. Melting of enriched Archean subcontinental lithospheric mantle: Evidence from the ca. 1760Ma volcanic rocks of the Xiong'er Group, southern margin of the North China Craton. *Precambrian Research*, 182(3): 204–216
- Watson EB and Harrison TM. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295–304
- Wu FY, Ge WC, Sun DY and Guo CL. 2003. Discussions on the lithospheric thinning in eastern China. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 51–60 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Lin JQ, Wilde SA, Zhang XO, Yang JH. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1): 103–119
- Wu FY, Li XH, Zheng YF and Gao S. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185–220 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Xu YG, Gao S and Zheng JP. 2008. Lithospheric thinning and destruction of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1145–1174 (in Chinese with English abstract)
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genesis of zircon and its constraint on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554–1569
- Xiang JF, Zhao HJ, Li YF, Cheng YB, Gao YL, Hou KJ, Dong CY and Li XQ. 2010. SHRIMP zircon U-Pb ages and Hf isotopic compositions of Zhangshiyang intrusive complex in the southern margin of the North China Craton and their geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 871–887 (in Chinese with English abstract)
- Xia QK, Liu J, Liu SC, Kovács I, Feng M and Dang L. 2013. High water content in Mesozoic primitive basalts of the North China Craton and implications on the destruction of cratonic mantle lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 361: 85–97
- Xie GQ, Mao JW, Li RL, Ye HS, Zhang YX, Wan YS, Li HM, Gao JJ and Zheng RF. 2007. SHRIMP zircon U-Pb dating for volcanic rocks of the Daying Formation from Baofeng basin in eastern Qinling, China and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2387–2396 (in Chinese with English abstract)
- Xu JF and Wang Q. 2003. Tracing the thickening process of continental crust through studying adakitic rocks: Evidence from volcanic rocks in the north Tibet. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 401–406 (in Chinese with English abstract)
- Xu XS, Griffin WL, Ma X, O'Reilly SY, He ZY and Zhang CL. 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. *Mineralogy and Petrology*, 97(1–2): 43–59
- Xu YG. 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, timing and mechanism. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(9–10): 747–757
- Yang JH, Wu FY and Wilde SA. 2003. A review of the geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the North China Craton: An association with lithospheric thinning. *Ore Geology Reviews*, 23(3): 125–152
- Yang JH, Chung SL, Wilde SA, Wu FY, Chu MF, Lo CH and Fan HR. 2005. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: Geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence. *Chemical Geology*, 214(1–2): 99–125
- Yang JH, Wu FY, Wilde SA, Belousova E and Griffin WL. 2008. Mesozoic decratonization of the North China block. *Geology*, 36(6): 467–470
- Ye HS, Mao JW, Xu LG, Gao JJ, Xie GQ, Li XQ and He CF. 2008. SHRIMP Zircon U-Pb dating and geochemistry of the Taishanmiao aluminous A-type granite in western Henan Province. *Geological Review*, 54(5): 699–711 (in Chinese with English abstract)
- Yuan HL, Gao S, Dai MN, Zong CL, Guenther D, Fontaine GH, Liu XM and Diwu CR. 2008. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser-ablation quadrupole and multiple-collector ICP-MS. *Chemical Geology*, 247(1–2): 100–118
- Zhai MG, Meng QR, Liu JM, Hou QL, Hu SB, Li Z, Zhang HF, Liu W, Shao J and Zhu RX. 2004. Geological features of Mesozoic tectonic regime inversion in eastern North China and implication for geodynamics. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 285–297 (in Chinese with English abstract)
- Zhang BR, Gao S and Zhang HF. 2002. Geochemistry of Qinling Orogenic Belt. Beijing: Science Press, 1–187 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Zhang BR, Yuan XC and Xiao QH. 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics. Beijing: Science Press, 1–855 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HF, Sun M, Zhou XH, Fan WM, Zhai MG and Yin JF. 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: Evidence from major-, trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144(2): 241–254
- Zhang HF, Jin LL, Zhang L, Harris N, Zhou L, Hu SH and Zhang BR. 2005. Geochemical and Pb-Sr-Nd isotopic compositions of granitoids from western Qinling belt: Constraints on basement nature and tectonic affinity. *Science in China (Series D)*, 50(2): 184–196
- Zhang ZQ, Zhang GW and Tang SH. 2002. The isotopic Geochronology of Metamorphic Strata in Southern Qinling. Beijing: Geological Publishing House, 1–348 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZW, Zhu BQ and Chang XY. 2000. Nd, Sr, Pb isotopic geochemistry of the alkali-rich intrusive rocks in East Qinling, central China and its tectonic significance. *Geochimica*, 29(5): 455–461 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZW, Zhu BQ, Chang XY and Xie J. 2002. Major element characteristics of the alkali-rich intrusive rocks zone and distribution of the subzones in the northern part of East Qinling, China. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 468–474 (in Chinese with English abstract)
- Zhao TP, Zhou MF, Jin CW, Guan H and Li HM. 2001. Discussion on age of the Xiong'er Group in southern margin of North China Craton. *Chinese Journal of Geology*, 36(3): 326–334 (in Chinese with English abstract)
- Zhao TP, Zhai MG, Xia B, Li HM, Zhang YX and Wan YS. 2004. Zircon U-Pb SHRIMP dating for the volcanic rocks of the Xiong'er Group: Constraint on the initial formation age of the cover of the North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 49(23): 2495–2502
- Zhao XM, Zhang HF, Zhu XK, Tang SH and Yan B. 2012. Iron isotope evidence for multistage melt-peridotite interactions in the lithospheric mantle of eastern China. *Chemical Geology*, 292–293: 127–139
- Zhou HS, Ma CQ, Zhang C, Chen L, Zhang JY and She ZB. 2008. Yanshanian aluminous A-type granitoids in the Chunshui of Biyang,

southern margin of North China Craton: Implications from petrology and geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 24(1): 49–64 (in Chinese with English abstract)

- Zhu G, Wang YS, Liu GS, Niu ML, Xie CL and Li CC. 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of strike-slip motion on the Tan-Lu fault zone, East China. *Journal of Structural Geology*, 27(8): 1379–1398
- Zhu LM, Zhang GW, Guo B and Li B. 2008. U-Pb (LA-ICP-MS) zircon dating for the large Jinduicheng porphyry Mo deposit in the East Qinling, China, and its metallogenetic geodynamical setting. *Acta Geologica Sinica*, 82(2): 204–220 (in Chinese with English abstract)
- Zhu XQ, Zhu WB, Ge RF and Wang X. 2014. Late Paleozoic provenance shift in the south-central North China Craton: Implications for tectonic evolution and crustal growth. *Gondwana Research*, 25(1): 383–400

附中文参考文献

- 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 罗照华, 杜杨松. 1994. 中国东部岩石圈根/去根作用与大陆“活化”——东亚型大陆动力学模式研究计划. *现代地质*, 8(3): 349–356
- 第五春荣, 孙勇, 林慈鑫, 柳小明, 王洪亮. 2007. 豫西宜阳地区 TTG 质片麻岩锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素地质学. *岩石学报*, 23(2): 253–262
- 高山, Rudnick RL, Carlson RW, McDonough WF, 刘勇胜. 2003. 华北克拉通岩石圈地幔置换作用和壳幔生长耦合的 Re-Os 同位素证据. *地学前缘*, 10(3): 61–67
- 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(3): 435–443
- 李曙光, Hart SR, 郑双根, 郭安林, 刘德良, 张国伟. 1989. 中国华北、华南陆块碰撞时代的钐-钕同位素年龄证据. *中国科学 (B 辑)*, (3): 312–319
- 李先梓, 严阵, 卢欣祥. 1993. 秦岭-大别山花岗岩. 北京: 地质出版社, 11–27
- 李永峰, 毛景文, 胡华斌, 郭保健, 白凤军. 2005. 东秦岭钼矿类型、特征、成矿时代及其地球动力学背景. *矿床地质*, 24(3): 292–304
- 林伟, 王军, 刘飞, 冀文斌, 王清晨. 2013. 华北克拉通及邻区晚中生代伸展构造及其动力学背景的讨论. *岩石学报*, 29(5): 1791–1810
- 刘振宏, 王世炎, 张良, 杨长秀, 武太安, 崔雪峰. 2004. 华北陆块南缘燕山期陆内造山岩浆活动特征. *地质调查与研究*, 27(1): 35–42
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 李晓峰, 王义天, 张长青, 李永峰. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景. *岩石学报*, 21(1): 169–188
- 涂湘林, 张红, 邓文峰, 凌明星, 梁华英, 刘颖, 孙卫东. 2011. RESOLUTION 激光剥蚀系统在微量元素原位微区分析中的应用. *地球化学*, 40(1): 83–98
- 王涛, 郑亚东, 张进江, 王新社, 曾令森, 童英等. 2007. 华北克拉通中生代伸展构造研究的几个问题及其在岩石圈减薄研究中的意义. *地质通报*, 26(9): 1154–1166
- 王团华, 毛景文, 王彦斌. 2008. 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(6): 1273–1287
- 吴福元, 葛文春, 孙德有, 郭春丽. 2003. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题. *地学前缘*, 10(3): 51–60
- 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
- 吴福元, 徐义刚, 高山, 郑建平. 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论. *岩石学报*, 24(6): 1145–1174
- 向君峰, 赵海杰, 李永峰, 程彦博, 高亚龙, 侯可军, 董春艳, 李向前. 2010. 华北地台南缘张士英岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 测年、Hf 同位素组成及其地质意义. *岩石学报*, 26(3): 871–887
- 谢桂青, 毛景文, 李瑞玲, 叶会寿, 张毅星, 万渝生, 李厚民, 高建京, 郑蓉芬. 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(10): 2387–2396
- 许继峰, 王强. 2003. Adakitic 火成岩对大陆地壳增厚过程的指示: 以青藏北部火山岩为例. *地学前缘*, 10(4): 401–406
- 叶会寿, 毛景文, 徐林刚, 高建京, 谢桂青, 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(5): 699–711
- 翟明国, 孟庆任, 刘建明, 侯泉林, 胡圣标, 李忠, 张宏福, 刘伟, 邵济安, 朱日祥. 2004. 华北东部中生代构造体制转折峰期的主要地质效应和形成动力学探讨. *地学前缘*, 11(3): 285–297
- 张本仁, 高山, 张宏飞. 2002. 秦岭造山带地球化学. 北京: 科学出版社, 1–187
- 张宏飞, 靳兰兰, 张利, Nigel H, 周炼, 胡圣虹, 张本仁. 2005. 西秦岭花岗岩类地球化学和 Pb-Sr-Nd 同位素组成对基底性质及其构造属性的限制. *中国科学 (D 辑)*, 35(10): 914–926
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 1–855
- 张宗清, 张国伟, 唐索寒. 2002. 南秦岭变质地层同位素年代学. 北京: 地质出版社, 1–348
- 张正伟, 朱炳泉, 常向阳. 2000. 东秦岭北部富碱侵入岩钨-铍-铅同位素特征及构造意义. *地球化学*, 29(5): 455–461
- 张正伟, 朱炳泉, 常向阳, 谢静. 2002. 东秦岭北部富碱侵入岩岩石化学与分布特征. *岩石学报*, 18(4): 468–474
- 赵太平, 周美夫, 金成伟, 关鸿, 李惠民. 2001. 华北陆块南缘熊耳群形成时代讨论. *地质科学*, 36(3): 326–334
- 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(1): 49–64
- 朱赖民, 张国伟, 郭波, 李森. 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(2): 204–220