

河南嵩山地区新太古代 TTG 质片麻岩的成因及其地质意义:来自岩石学、地球化学及同位素年代学的制约*

周艳艳^{1,3} 赵太平^{1**} 薛良伟² 王世炎⁴ 高剑峰⁵

ZHOU YanYan^{1,3}, ZHAO TaiPing^{1**}, XUE LiangWei², WANG ShiYan⁴ and GAO JianFeng⁵

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

2. 河南省国土资源科学研究院, 郑州 450053

3. 中国科学院研究生院, 北京 100039

4. 河南省地质调查院, 郑州 450001

5. 香港大学地球科学系, 香港

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Henan Scientific Research Institute of Land Resources, Zhengzhou 450053, China

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

4. Henan Institute of Geological Survey, Zhengzhou 450001, China

5. Department of Earth Sciences, The University of Hong Kong, Hong Kong

2008-12-20 收稿, 2009-01-12 改回.

Zhou YY, Zhao TP, Xue LW, Wang SY and Gao JF. 2009. Petrological, geochemical and chronological constraints for the origin and geological significance of Neoproterozoic TTG gneiss in the Songshan area, North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2):331–347

Abstract Neoproterozoic TTG gneisses widely occurred in the Songshan area, Henan Province. They mainly consist of granitoid and minor diorite, with a crystallization age of 2600 ~ 2500Ma by zircon SHRIMP U-Pb technique. The TTG gneisses are rich in SiO₂ (>67%) and Na₂O (3% to 7%), but have low K₂O/Na₂O ratios and low FeO^T and MgO contents. Their A/NCK ratios range from 0.97 to 1.21, consistent with tonalities to trondhjemite trend. The Songshan TTG gneisses are geochemically similar to high-Al TTG assemblage. The Songshan TTG gneisses have low REE contents, with differentiated LREE/HREE patterns and no Eu anomalies on the chondrite-normalized REE patterns. The Songshan TTG have high Sr (433×10^{-6} on the average) and Sr/Y ratios (165 on the average) and low Rb/Sr ratios, and display negative Nb, Ta and Ti anomalies on the primitive-mantle normalized trace element patterns. Their Nb/Ta ratios are averaged to be about 14 and La/Nb ratios are 7. These indicate that the Songshan TTG may have formed in an island arc or a continent marginal arc. The whole rock Nd isotopic compositions and zircon Hf isotopic compositions indicate that the Songshan TTG may originated from a juvenile crust derived from a depleted mantle at 2.6Ga with minor assimilation of ancient crust, while the variable Mg[#] values of the Songshan TTG indicate different degrees of contamination of mantle wedge. Therefore, the Songshan TTG gneiss may have formed by partial melting of a subducted basaltic slab with garnet and amphibolite left in the residual magmas. The emplacement of the Songshan TTG indicates an ancient oceanic crust may have existed at 2.53 Ga before the collisions of different micro-continents in North China Craton.

Key words Neoproterozoic; TTG gneiss; Geochemistry; Geochronology; North China Craton

摘要 河南嵩山地区位于华北克拉通南缘,是我国记录前寒武纪地质的典型地区之一。该区广泛出露新太古代 TTG 质片麻岩套,主要以英云闪长岩类为主,闪长岩类次之,测得的锆石 SHRIMP 年龄在 2600 ~ 2500Ma。该套 TTG 质片麻岩富 Na₂O

* 本文获国家基础研究发展计划(973 项目)“华北大陆边缘造山过程与成矿”(2006CB403502)和国家自然科学基金(40672058)资助。

第一作者简介:周艳艳,女,1983 年生,硕士研究生,岩石地球化学专业,E-mail:llylz_b3@163.com

** 通讯作者:赵太平,男,1963 年生,研究员,岩石学专业,E-mail:tpzhao@gig.ac.cn" tpzhao@gig.ac.cn

(3%~7%)、 SiO_2 (>67%)、贫铁、镁,高的 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值(多在 1.5~5.2), $\text{Al}_2\text{O}_3 = 13.72\% \sim 16.37\%$, $\text{A}/\text{CNK} = 0.97 \sim 1.21$, 属英云闪长岩-奥长花岗岩系列,显示新太古代富铝型 TTG 岩石特征。岩石富 Sr (平均 433×10^{-6}), Rb/Sr 比值 (<0.5) 较低, Sr/Y 比值高(平均 165), Nb、Ta 和 Ti 负异常, $\sum \text{REE}$ 偏低, 强烈分异 ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 27 \sim 150$), 基本无 Eu 异常, 低的 Nb/Ta (14 左右)、La/Nb (平均约为 7) 比值及其它微量元素特征表明其与岛弧或大陆边缘弧玄武质岩石特征相似。全岩 Nd 同位素和锆石 Hf 同位素数据显示岩石源区是来自亏损地幔的约 2.66Ga 的初生地壳; $\text{Mg}^\#$ 值变化较大反映存在地幔楔不同程度的混染。地球化学特征指示该岩浆是在较高温度和压力(约 700~1000°C, >1.5Gpa) 下由俯冲的含水玄武质洋壳部分熔融形成, 残留相中有石榴石和角闪石而不含斜长石。嵩山地区 TTG 片麻岩的这种成因机制表明当时陆壳以水平方式增生, 也说明在随后的 2.5Ga 左右微陆块碰撞拼合事件之前不同陆块之间很可能被一个古大洋所分隔。

关键词 晚太古代; TTG 质片麻岩; 地球化学; 年代学; 华北克拉通南缘

中图法分类号 P588.122; P597.3

1 引言

TTG 岩系是英云闪长岩 (Tonalite)-奥长花岗岩 (Trondhjemite)-花岗闪长岩 (Granodiorite) 的合称 (Jahn *et al.*, 1981), 以富 Na_2O (3%~7%)、 SiO_2 (>67%)、贫铁、低 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值 (<0.5) 为特征 (Smithies, 2002; Smithies and Champion, 2000)。约 90% 的初始大陆壳 (4.0~2.5Ga) 是由 TTG 岩系构成 (Jahn *et al.*, 1981; Martin *et al.*, 1983)。很多学者认为, 研究 TTG 岩石的成因及构造环境可以为早期地壳演化过程及机制提供重要信息 (Condie, 2005), 它还是了解地球早期地壳成分以及太古宙热传输速率的窗口 (Jackson, 2005)。现今, 与高压平衡的 TTG 质片麻岩是镁铁质岩石部分熔融形成这一观点已被大多数人接受 (如: Kampunzu *et al.*, 2003), 但是通过何种方式形成则存在分歧。正因此, TTG 岩系一直受到广泛关注, 其形成时间及增生机制也是现代地球科学研究中的重要课题之一 (Martin, 1999, 2005; Smithies, 2000; Martin and Moyen, 2002; Condie, 2005)。

华北克拉通是世界上最古老的克拉通之一。对于华北克拉通早前寒武纪地质及其演化, 前人进行过大量卓有成效的研究工作 (如: Jahn and Zhang, 1984; Liu *et al.*, 1992; 翟明国和郭敬辉, 1992; 翟明国和李江海, 1995; 伍家善等, 1998; 邓晋福和吴宗絮, 1999)。然而, 许多问题未有共识, 例如: 如何认识和理解华北克拉通早期大陆地壳的性质及其形成与演化过程 (翟明国和刘文军, 2001)? 华北克拉通早期类似于现代的板块构造是否存在? 华北克拉通新太古代末地壳演化是垂直增生模式 (沈其韩等, 1992; 王鸿祯, 1997; 赵振华, 1997) 还是微陆块拼贴或规模较小的板块构造模式 (沈其韩和钱祥麟, 1995; 翟明国和卞爱国, 2000)?

关于华北克拉通前寒武纪地质, 现有的研究大部分集中在华北中部及中北部地区 (如胶东、鞍山等), 对华北克拉通南缘基底构造演化等方面的研究较薄弱 (伍家善等, 1998)。河南嵩山地区位于华北克拉通南缘、豫西中部山地的东北部, 是我国记录前寒武纪地质的典型地区之一, 该区出露的前寒武纪岩石 (地层) 较为集中, 岩石序列发育完整, TTG 片

麻岩占出露岩石面积的 70% 以上 (郭安林, 1989; 涂荫玖, 1994; 伍家善等, 1998)。对该套 TTG 质片麻岩过去有不同认识: 1) 早期多将其当作混合岩地层对待, 和登封群一起称为登封杂岩 (张伯声, 1951; 张国伟等, 1982; 劳子强, 1989); 2) 郭安林 (1989) 提出登封杂岩为花岗-绿岩的认识; 3) 陈衍景等 (1989, 1990) 根据“登封群”表壳岩残留体及其地球化学特征, 将登封群解体为石牌河杂岩和君召群表壳岩, 并认识到石牌河杂岩是由变质上壳岩和变质侵入岩共同构成且强烈混合岩化的杂岩体; 4) 劳子强等 (1996) 认为是古老侵入的 TTG 质片麻岩体, 并将其从变质地层 (登封群表壳岩) 中划分出来。但目前还缺少相关的较系统的地球化学、年代学 and 同位素资料。

我们选择嵩山地区的大塔寺英云闪长岩、会善寺奥长花岗岩和青杨沟闪长质片麻岩等研究相对薄弱、具有类似 TTG 特征的变质片麻岩体, 通过详细的岩石学、岩石地球化学、Nd-Hf 同位素示踪和锆石 SHRIMP 年代学等方法, 探讨 TTG 物质来源、成因及其构造演化过程, 进而为认识整个华北克拉通统一结晶基底的属性、形成和演化提供依据。

2 区域地质概况

河南嵩山地区早前寒武纪岩石序列主要包括新太古代登封群表壳岩、TTG 质侵入岩体和古元古代嵩山群, 以及一些元古宙的变质基性岩墙群、伟晶岩脉及正长花岗岩系列, 它们共同构成了嵩山地区早前寒武纪结晶基底 (图 1)。TTG 片麻岩总出露面积约 53.5km², 各岩体自东向西分布, 片麻理南北向延伸。空间上 TTG 质片麻岩与登封群表壳岩密切共生, 并侵入登封群的西边。

登封城区一带的片麻岩分别包括大塔寺英云闪长质片麻岩、会善寺奥长花岗岩质片麻岩和牛屋栏奥长花岗岩片麻岩 (图 1)。大塔寺英云闪长质片麻岩体由于受到变质变形作用, 岩石外貌为条带状黑云斜长片麻岩, 岩体北、西侧被古元古代嵩山群沉积地层覆盖, 南侧被古元古代末期的石秤正长花岗岩体吞噬, 岩体中部被会善寺片麻岩体及牛屋栏片麻岩体吞噬。会善寺奥长花岗岩质片麻岩体由成分较均一的中细粒黑云斜长片麻岩组成, 南部被牛屋栏奥长花岗岩片麻岩体吞

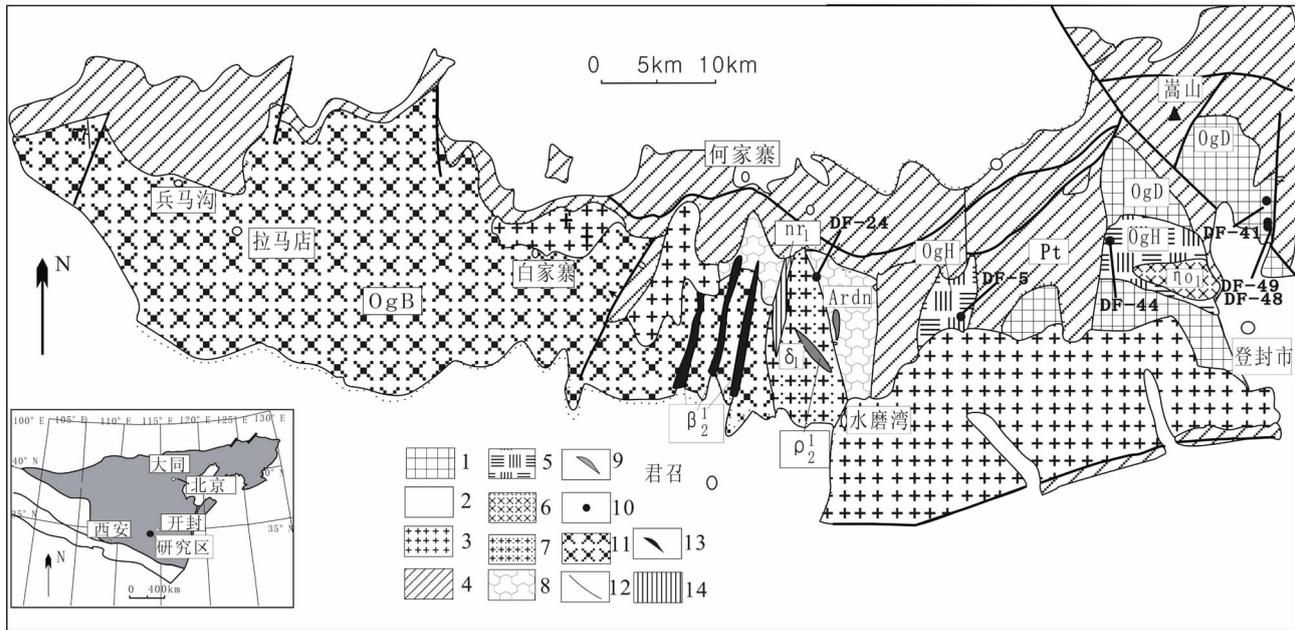


图1 嵩山地区 TTG 质片麻岩地质图

1-大塔寺英云闪长岩(OgD); 2-显生宙地层; 3-钾长花岗岩; 4-元古宙地层; 5-会善寺奥长花岗岩(OgH); 6-牛屋栏奥长花岗岩(η_{01}); 7-青杨沟变辉长闪长岩($\eta_{\gamma 1}$); 8-太古宙登封群地层(Ardn); 9-晋窑伟晶岩(ρ_2^1); 10-采样位置; 11-北沟二长花岗岩(OgB); 12-断层; 13-李家沟基性岩墙群(β_2^1); 14-吴家门变辉长闪长岩($\eta_{\gamma 1}$)

Fig. 1 Simplified geological map of TTG gneiss in Songshan area

1-Datasi tonalite (OgD); 2-Phanerozoic stratum; 3-moyite; 4-Proterozoic stratum; 5-Huishansi trondhjemite (OgH); 6-Niuwulan trondhjemite (η_{01}); 7-Qinggyangou meta-gabbrodiorite ($\eta_{\gamma 1}$); 8-Archaean Dengfeng Group stratum (Ardn); 9-Jinyaopegmatite (ρ_2^1); 10-samples position; 11-Beigou adamellite (OgB); 12-fault; 13-Lijiagou basic dike swarm (β_2^1); 14-Wujiamen meta-gabbrodiorite ($\eta_{\gamma 1}$)

噬,西部被第四系覆盖,东、西部被古元古代嵩山群不整合覆盖,北部与中-新元古代五佛山群马鞍山组呈断层接触,南部被石秤正长花岗岩体侵吞。牛屋栏奥长花岗岩片麻岩体为特征的灰白色奥长花岗岩,矿物成分和岩石组构均一,呈楔状,北东向展布(图1)。

君召北区片麻岩由西到东包括北沟二长花岗片麻岩体、青杨沟闪长质片麻岩体和吴家门二长花岗质片麻岩体。北沟二长花岗片麻岩体由矿物成分和岩石组构均一的黑云斜长片麻岩组成,岩体北部侵入登封群郭家窑组,东部和西北部分别被青杨沟闪长质片麻岩体、吴家门二长花岗质片麻岩体及早古元古代路家沟、白家寨正长花岗岩体侵吞,南部广大地区被第四系覆盖。青杨沟闪长质片麻岩体东部边界附近普遍具片麻状构造,并以灰色闪长片麻岩为主,岩体大致沿登封群区域倒转背斜核部侵入,与郭家窑组呈明显的侵入关系。

3 样品及其岩相学特征

本文选取嵩山地区大塔寺英云闪长质片麻岩、会善寺奥长花岗质片麻岩和青杨沟闪长质片麻岩体,样品采集地点见图1。

3.1 英云闪长质片麻岩

样品 DF-41、DF-48 采自大塔寺英云闪长质片麻岩体中,岩石为鳞片变晶结构,条带状、片麻状构造。角闪石占15%左右,长英质矿物主要由斜长石(30%~60%)、石英(15%~25%)、黑云母(15%~30%)、绿泥石(1%~3%)组成,少量的方解石、钾长石等。石英波状消光,斜长石聚片双晶常见,且已普遍绢云母化,黑云母以聚集条带状分布,多已绿泥石化。岩石中浅色粗条带由斜长石和石英组成,暗色基质由中细粒黑云母、斜长石、石英组成,局部出现斜长石蚀变的帘石类矿物。在岩石的浅色条带及暗色基质中可见到斜长石、角闪石和钾长石碎斑残存,显示韧性变形的残斑结构。

3.2 奥长花岗质片麻岩

样品 DF-5 采自石秤正长花岗岩体北西方向的会善寺奥长花岗岩体中,DF-44 采自登封城区西北方向附近的会善寺奥长花岗片麻岩体中,该类花岗片麻岩的矿物组合和岩石组构较为均一,为中-细粒黑云斜长片麻岩,主要矿物有奥长石(60%~70%)、石英(25%)、黑云母(1%~5%)、钾长石(1%~3%),其矿物成分与英云闪长质片麻岩相似,但石英

和长石含量多,黑云母含量低,粒度更细,片麻理发育弱,普遍具有变余花岗岩结构。

3.3 二长花岗片麻岩

样品 DF-49 采自大塔寺英云闪长岩体中,该类岩石具较均一的片麻状构造。岩石主要矿物成分有斜长石(30%~45%)、微斜长石(30%~40%)、石英(20%~25%)、黑云母(3%~5%),表现出二长花岗岩的组成特征。斜长石具聚片双晶,绢云母化微弱,钾长石泥化普遍,岩石中常有斜长石集合体呈眼球状产出,石英也呈集合透镜体状,局部拉长成条纹状或丝状,显示变晶糜棱结构(主要为粒状变晶结构、变余花岗岩结构)。

3.4 变闪长质片麻岩

样品 DF-24 采自青杨沟变闪长质片麻岩体中,岩石具半自形粒状结构、块状构造及糜棱结构、片麻状-流状构造,主要由角闪石(30%~40%)、斜长石(5%~10%)、钾长石(35%~55%)、石英(1%~5%)及少量黑云母组成。主要矿物组成颗粒大小不等,交代现象发育。角闪石主要呈褐绿色细小纤维状集合体产出,斜长石粒径在0.2~1.5mm,常被钾长石、绿帘石交代,钾长石的小颗粒多呈集合体填充在大颗粒钾长石的空隙中,说明岩体形成后受到应力作用的影响。

4 分析方法

首先对样品进行无污染全岩样品加工和单矿物分选。主、微量元素测试是在中国科学院广州地球化学研究所进行。主量元素用 X-射线荧光光谱法(XRF)测试,XRF 分析精度为2%。微量元素采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS PE Elan 6000 型)进行测试,精度高于5%,RSD% < 5%,分析流程见梁细荣等(2003)。4个样品的全岩 Nd 同位素测定在中国科学院广州地球化学研究所元素与同位素地球化学实验室的 Micromass ISOPROBE 型多接收电感耦合等离子体质谱仪上进行,详细的实验流程和分析方法见梁细荣等(2003)。锆石 Hf 同位素测定是在中国科学院地质与地球物理研究所 Geolas193nm ArF 激光剥蚀的 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)上进行,所作锆石的粒径在80~150 μm 之间,采用激光束直径为40 μm ,剥蚀频率为10Hz,能量密度为15J/cm²,典型剥蚀时间为27s,剥蚀深度20~30 μm 。更详细的仪器状况和分析程序见 Xu *et al.* (2004)。数据标准化据¹⁷⁹Hf/¹⁷⁷Hf = 0.7325,质量歧视校正用指数模式进行,干扰校正取¹⁷⁶Lu/¹⁷⁵Lu = 0.02655(Chu *et al.*, 2002)和 $\beta_{\text{Yb}}/\beta_{\text{Hf}} = 0.8725$ (Xu *et al.*, 2004)。

锆石的 U、Th 和 Pb 含量及同位素组成分析在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心的 SHRIMP II 上进行,详细分析流程和原理参考文献见(Compston *et al.*, 1984;

Williams *et al.*, 1996; 宋彪等, 2002)。应用 RSES 参考锆石 TEM (417Ma) 进行元素分馏校正,以 SL13(年龄 572Ma; U 含量 238×10^{-6}) 标定样品的 U、Th 和 Pb 含量,用 ISOPLOT 软件处理数据。用实测²⁰⁴Pb 校正锆石中的普通铅,表 1 所列的单个数据点的误差均用 1 σ 表示,采用年龄为²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄,其加权平均值为 95% 的置信度。

5 锆石 SHRIMP 年代学

DF-44、DF-49 样品的离子探针分析结果见表 1。

DF-49 锆石 CL 图像(图 2A)显示锆石可能是原岩岩浆锆石或者是遭受不同程度的变质重结晶的原岩继承锆石,它们韵律环带有的清晰可见(如 12.1),有的模糊,环带的连续性也有所不同,反映重结晶程度不同。Th 含量为 89×10^{-6} ~ 732×10^{-6} , U 含量为 191×10^{-6} ~ 849×10^{-6} , Th/U 比值较高,18 个点的比值范围为 0.28 ~ 1.45,平均 0.82,在岩浆成因锆石 Th/U 比值范围内(Hoskin and Black, 2000; Belousova *et al.*, 2002)。对锆石的 18 个点 SIMS 分析,²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄在 2128 ± 42 ~ 2550 ± 28 Ma 间,上交点年龄为 2529 ± 23 Ma(图 2B),其中 1.1、2.1、12.1、13.1、14.1(图 2A(2))²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄在 2480 ± 12 ~ 2550 ± 28 Ma,加权平均年龄为 2488 ± 18 Ma,与上交点年龄 2529 ± 23 Ma 在误差范围内基本一致,因此,2500Ma 左右可能代表二长花岗片麻岩岩浆锆石的结晶年龄。其余锆石(图 2A(1)、图 2B)²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄较低(2128 ± 42 ~ 2434 ± 13 Ma),加权平均年龄为 2397 ± 33 Ma,可能是变质重结晶作用导致 Pb 丢失引起年龄降低。原岩锆石和变质重结晶锆石没有年龄数据时很难严格区分,在某种意义上为同一类锆石,因此,2340Ma 左右可能代表后期改造年龄。

DF-44 锆石较为复杂,从 CL 图像中看出(图 3A)有三种锆石,1、多数锆石的内部结构中保存了明显的岩浆振荡环带(图 3(1)、3(2)): (1) 中有两个锆石(17.1 和 19.1 分析点)具有明显的核边结构,核部可见熔蚀现象,其锆石²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄(2660 ± 19 Ma 和 2613 ± 11 Ma) 与该组中其它具明显的岩浆振荡环带的锆石(21.1、10.1、2.1、19.1、7.1、4.1 分析点对应的锆石,²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄 = 2528 ± 48 ~ 2637 ± 32 Ma) 的环带幔部分析点年龄基本一致,内部 U 含量都较低(如 19.1、10.1 锆石颗粒); (2) 另外一种锆石(5.1、6.1、8.1、9.1、13.1、15.1、18.1、20.1 分析点)也具有与岩浆系统一致出现的振荡环带,锆石整体颜色较暗,内部出现较窄白色环带(3~10 μm),而且有的环带并不沿晶体/熔体之间的界面(如 20.1 锆石颗粒),这可能是示踪元素(如 U 等)受到外力的影响而造成(Hoskin and Black, 2000),锆石²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄(1921 ± 92 ~ 2283 ± 28 Ma) 较年轻,与具核边结构的锆石边部年龄一致。2、第三种锆石具有条带状内部结构(分析点 1.1、3.1、11.1、12.1、14.1,见图 3(3)),边部出现窄的较亮的 CL 发光,为变质锆石的增生边,该类锆石表现出更年轻的²⁰⁷Pb

表 1 嵩山地区 TTG 质片麻岩锆石的 SHRIMP U-Pb 数据

Table 1 Zircon SHRIMP U-Pb analysis data of TTG gneiss in Songshan area

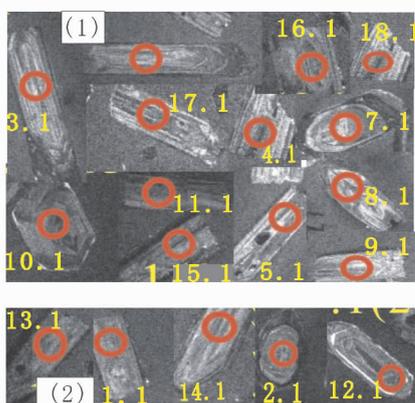
点号	$^{206}\text{Pb}_c\%$	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	$^{206}\text{Pb}^*$ ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ (Ma)	\pm (Ma)	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ (Ma)	\pm (Ma)	Total $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm \%$
DF-49-1.1	0.15	720	502	0.72	189	1,721	9.9	2,484	6.2	0.1640	0.33
DF-49-2.1	1.20	228	89	0.41	64.5	1,819	29	2,550	28	0.1790	1.1
DF-49-3.1	0.67	400	470	1.22	88.6	1,470	12	2,404	13	0.1606	0.47
DF-49-4.1	0.71	533	575	1.12	74.6	968.0	10	2,249	27	0.1472	1.3
DF-49-5.1	2.42	849	732	0.89	78.7	644.7	5.0	2,128	42	0.1503	0.76
DF-49-6.1	0.96	442	501	1.17	93.0	1,402	11	2,405	17	0.1628	0.50
DF-49-7.1	0.38	460	130	0.29	102	1,479	9.3	2,434	13	0.1610	0.43
DF-49-8.1	2.50	412	224	0.56	80.2	1,287	8.9	2,371	36	0.1717	0.48
DF-49-9.1	0.62	441	642	1.50	91.9	1,392	8.8	2,408	14	0.1605	0.55
DF-49-10.1	2.43	496	152	0.32	82.9	1,121	9.0	2,358	51	0.1697	1.8
DF-49-11.1	0.85	394	256	0.67	84.6	1,428	9.3	2,415	22	0.1629	0.64
DF-49-12.1	0.46	257	285	1.14	87.8	2,148	14	2,503	17	0.1684	0.88
DF-49-13.1	0.33	348	410	1.22	115	2,089	13	2,480	12	0.1652	0.65
DF-49-14.1	0.65	191	156	0.84	67.9	2,222	16	2,496	26	0.1695	1.1
DF-49-15.1	0.76	651	376	0.60	111	1,155	8.0	2,399	26	0.1606	1.3
DF-49-16.1	0.58	415	372	0.93	89.5	1,435	9.4	2,404	18	0.1598	0.54
DF-49-17.1	1.72	543	450	0.86	68.5	868.7	7.5	2,344	44	0.1627	1.6
DF-49-18.1	1.43	463	364	0.81	81.8	1,190	8.7	2,424	35	0.1680	0.71
DF-44-1.1	3.08	1583	141	0.09	152	663.1	4.7	1,921	92	0.1412	3.3
DF-44-2.1	0.91	257	61	0.25	58.1	1,493	14	2,528	48	0.1742	2.6
DF-44-3.1	4.71	1947	183	0.10	127	451.2	3.5	1,743	100	0.1425	0.76
DF-44-4.1	0.37	252	125	0.51	103	2,504	17	2,619	11	0.1796	0.54
DF-44-5.1	5.98	302	30	0.10	36.4	799.9	7.6	2,153	100	0.1795	0.86
DF-44-6.1	2.52	1263	94	0.08	131	719.3	4.6	2,079	46	0.1477	1.0
DF-44-7.1	0.12	261	198	0.78	82.5	2,021	20	2,637	32	0.1792	1.9
DF-44-8.1	0.83	963	109	0.12	97.9	715.2	7.2	2,039	34	0.1321	1.6
DF-44-9.1	1.55	695	37	0.05	79.1	790	5.2	2,283	28	0.1562	0.81
DF-44-10.1	0.95	110	36	0.34	36.7	2,091	18	2,588	26	0.1814	0.87
DF-44-11.1	1.09	1340	75	0.06	89.6	477.9	3.0	1,729	30	0.1142	0.82
DF-44-12.1	2.62	1282	104	0.08	114	619	4.1	1,924	49	0.1378	0.43
DF-44-13.1	0.63	779	54	0.07	99.9	892.3	6.0	2,197	17	0.1424	0.67
DF-44-14.1	1.36	1395	71	0.05	117	593.5	3.8	1,989	34	0.1324	0.79
DF-44-15.1	0.66	839	95	0.12	117	966.4	5.9	2,223	13	0.1447	0.42
DF-44-16.1	0.38	196	82	0.43	77.0	2,420	16	2,635	21	0.1814	1.2
DF-44-17.1	0.72	136	35	0.26	41.8	1,964	42	2,660	19	0.1867	0.9
DF-44-17.2	3.03	1882	102	0.06	148	547.9	5.4	2,111	60	0.1534	0.42
DF-44-18.1	1.84	1065	401	0.39	110	719.9	5.5	2,151	47	0.1640	0.33
DF-44-19.1	0.32	261	100	0.40	85.2	2,073	13	2,613	11	0.1790	1.1
DF-44-20.1	1.16	859	51	0.06	97.1	7889	6.0	2,123	26	0.1606	0.47
DF-44-21.1	0.38	293	165	0.58	86.7	1,901	12	2,572	22	0.1472	1.3

点号	$\frac{^{238}\text{U}}{^{206}\text{Pb}^*}$	$\pm \%$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$	$\pm \%$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}}$	$\pm \%$	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	$\pm \%$	误差相关性
DF-49-1.1	3.268	0.65	0.1627	0.37	6.866	0.75	0.3060	0.65	0.872
DF-49-2.1	3.068	1.8	0.1692	1.7	7.600	2.5	0.3259	1.8	0.736
DF-49-3.1	3.904	0.89	0.1552	0.78	5.483	1.2	0.2562	0.89	0.750
DF-49-4.1	6.174	1.2	0.1418	1.6	3.166	1.9	0.1620	1.2	0.596
DF-49-5.1	9.508	0.81	0.1322	2.4	1.917	2.5	0.1052	0.81	0.320
DF-49-6.1	4.117	0.84	0.1553	0.99	5.200	1.3	0.2429	0.84	0.644
DF-49-7.1	3.878	0.70	0.1580	0.76	5.617	1.0	0.2578	0.70	0.681
DF-49-8.1	4.527	0.77	0.1522	2.1	4.630	2.2	0.2209	0.77	0.343
DF-49-9.1	4.150	0.70	0.1556	0.80	5.169	1.1	0.2410	0.70	0.657

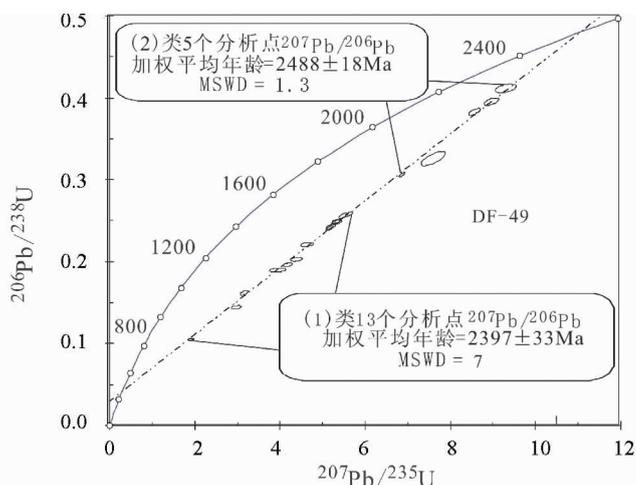
续表 1

Continued Table 1

点号	$\frac{^{238}\text{U}}{^{206}\text{Pb}^*}$	$\pm\%$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$	$\pm\%$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}}$	$\pm\%$	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	$\pm\%$	误差相关性
DF-49-10.1	5.266	0.87	0.1510	3.0	3.950	3.1	0.1899	0.87	0.279
DF-49-11.1	4.033	0.73	0.1562	1.3	5.339	1.5	0.2479	0.73	0.498
DF-49-12.1	2.529	0.77	0.1645	1.0	8.970	1.3	0.3954	0.77	0.606
DF-49-13.1	2.612	0.72	0.1623	0.74	8.569	1.0	0.3828	0.72	0.698
DF-49-14.1	2.430	0.84	0.1639	1.6	9.300	1.8	0.4115	0.84	0.471
DF-49-15.1	5.095	0.76	0.1547	1.5	4.187	1.7	0.1963	0.76	0.446
DF-49-16.1	4.010	0.73	0.1552	1.1	5.336	1.3	0.2494	0.73	0.569
DF-49-17.1	6.932	0.92	0.1498	2.6	2.980	2.7	0.1443	0.92	0.336
DF-49-18.1	4.932	0.80	0.1570	2.1	4.389	2.2	0.2028	0.80	0.359
DF-44-1.1	9.232	0.75	0.1177	5.1	1.758	5.2	0.1083	0.75	0.144
DF-44-2.1	3.838	1.1	0.1671	2.8	6.000	3.0	0.2605	1.1	0.353
DF-44-3.1	13.79	0.80	0.1067	5.5	1.066	5.6	0.0725	0.80	0.144
DF-44-4.1	2.107	0.83	0.1764	0.68	11.54	1.1	0.4746	0.83	0.774
DF-44-5.1	7.570	1.0	0.1342	5.8	2.440	5.9	0.1321	1.0	0.172
DF-44-6.1	8.471	0.67	0.1286	2.6	2.093	2.7	0.1181	0.67	0.248
DF-44-7.1	2.715	1.2	0.1782	1.9	9.050	2.3	0.3683	1.2	0.521
DF-44-8.1	8.523	1.1	0.1258	1.9	2.034	2.2	0.1173	1.1	0.486
DF-44-9.1	7.670	0.7	0.1446	1.6	2.599	1.8	0.1304	0.70	0.400
DF-44-10.1	2.610	1.0	0.1731	1.6	9.150	1.9	0.3832	1.0	0.552
DF-44-11.1	12.99	0.65	0.1059	1.6	1.123	1.7	0.0770	0.65	0.373
DF-44-12.1	9.922	0.69	0.1178	2.7	1.638	2.8	0.1008	0.69	0.244
DF-44-13.1	6.736	0.72	0.1375	0.95	2.815	1.2	0.1485	0.72	0.602
DF-44-14.1	10.37	0.68	0.1222	1.9	1.625	2.0	0.0964	0.68	0.337
DF-44-15.1	6.183	0.66	0.1396	0.78	3.114	1.0	0.1617	0.66	0.647
DF-44-16.1	2.195	0.79	0.1781	1.3	11.19	1.5	0.4556	0.79	0.525
DF-44-17.1	2.808	2.5	0.1808	1.2	8.880	2.7	0.3561	2.5	0.906
DF-44-17.2	11.27	1.0	0.1310	3.4	1.602	3.6	0.0887	1.0	0.288
DF-44-18.1	8.464	0.80	0.1340	2.7	2.183	2.8	0.1182	0.80	0.285
DF-44-19.1	2.636	0.76	0.1757	0.65	9.192	1.0	0.3794	0.76	0.757
DF-44-20.1	7.685	0.81	0.1319	1.5	2.366	1.7	0.1301	0.81	0.475
DF-44-21.1	2.915	0.73	0.1715	1.3	8.110	1.5	0.3430	0.73	0.480



(A)



(B)

图2 嵩山地区 TTG 质片麻岩样品 DF-49 锆石 CL 图像(A)和锆石 SHRIMP 年龄(B)

Fig.2 Zircon CL images (A) and zircon SHRIMP age diagram (B) of TTG gneiss sample DF-49 in Songshan area

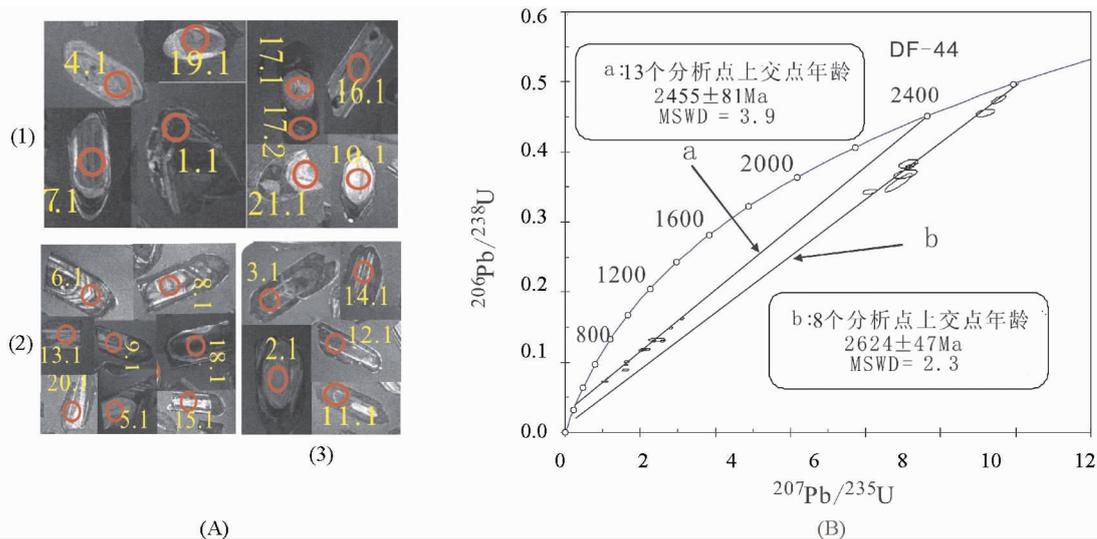


图3 嵩山地区 TTG 质片麻岩样品 DF-44 锆石 CL 图像(A)和锆石 SHRIMP 年龄(B)

Fig. 3 Zircon CL images (A) and zircon SHRIMP age diagram (B) of TTG gneiss sample DF-44 in Songshan area

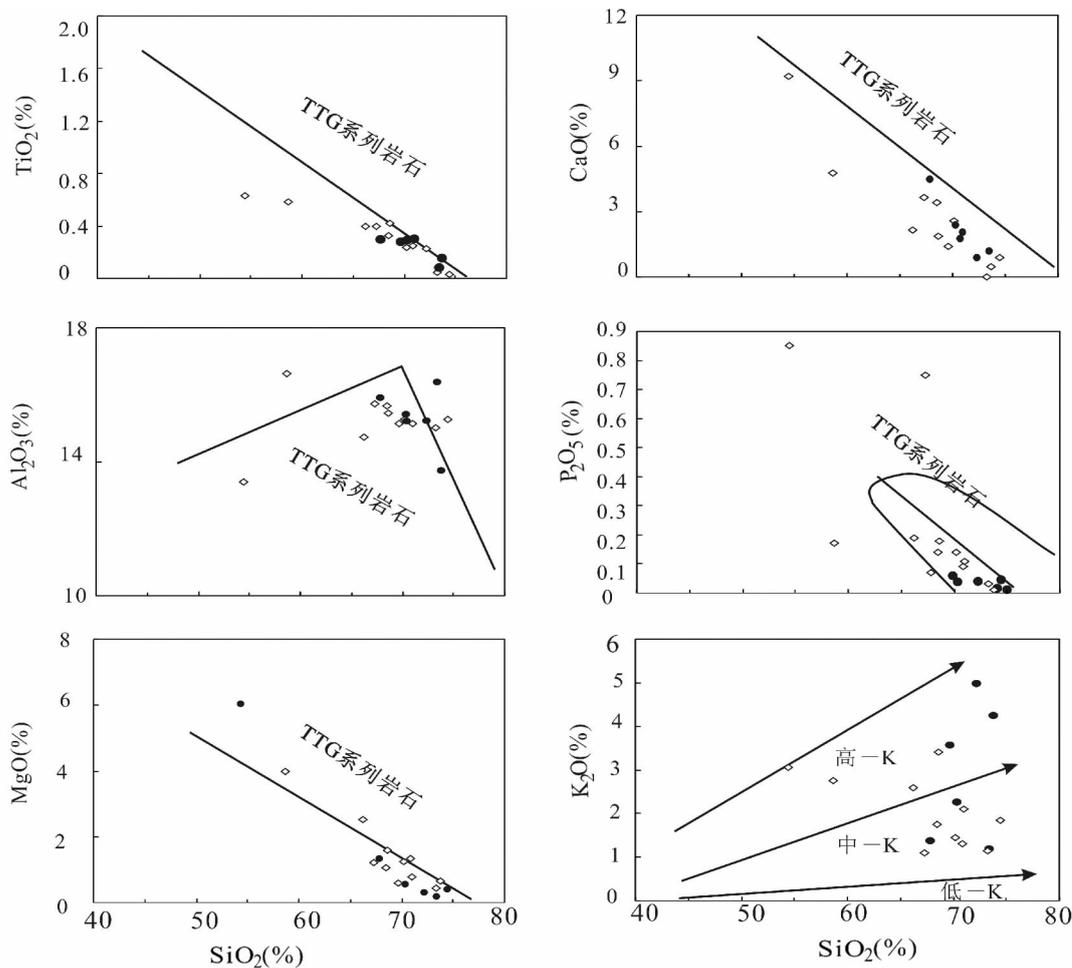


图4 嵩山地区 TTG 质片麻岩 Harker 图解

●本次工作所测的嵩山地区 TTG 质片麻岩样品; ◇嵩山地区 TTG 片麻岩样品(引自劳子强等, 1996)

Fig. 4 Harker-type diagrams for TTG gneiss from Songshan area

●Our samples of TTG gneiss; ◇TTG gneiss samples in Songshan area (from Lao et al., 1996)

^{206}Pb 年龄 ($1729 \pm 30 \sim 1989 \pm 34\text{Ma}$)。

在 U-Pb 谱和图上(图 3B), 1 中的(1)类锆石(以前段分析序号对应锆石类型, 以下同)构成一条不一致线(图 3B-b), 加权平均年龄($2617 \pm 21\text{Ma}$)与谐和线上交点年龄($2624 \pm 47\text{Ma}$)基本一致, 分析点落在谐和线下靠近上交点的部分, Th/U 比值较高(0.25 ~ 0.78), 结合锆石内部结构, 2600Ma 左右可能代表奥长花岗岩岩浆锆石的结晶年龄。1 中的(2)类锆石和 2 中的锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权年龄分别为 $2191 \pm 49\text{Ma}$ 和 $1855 \pm 170\text{Ma}$, 由于距离上交点较远, 误差较大, 加权年龄值不宜说明地质事件。该两类锆石 Th/U 比值都较低(分别平均为 0.1 和 0.8), 而且, 在谐和图上二者构成一条不一致线(图 3B-a), 上交点年龄为 $2455 \pm 81\text{Ma}$, 可能是后期改造年龄, 代表一次构造热事件, 与 DF-49 所得出的后期改造年龄基本一致。

因此, 嵩山地区 TTG 片麻岩岩浆结晶年龄应在 2500 ~ 2600Ma 左右, 在 U-Pb 谱和图上, 锆石点均落在一致曲线的下方, 可能是由于后期铅丢失造成的。

6 岩石地球化学特征

6.1 主量元素

研究区片麻岩样品的主、微量元素分析结果列于表 2。为更全面的认识该区 TTG 片麻岩地球化学特征, 我们在分析过程中结合了劳子强等(1996)对本区 TTG 片麻岩所作的 11

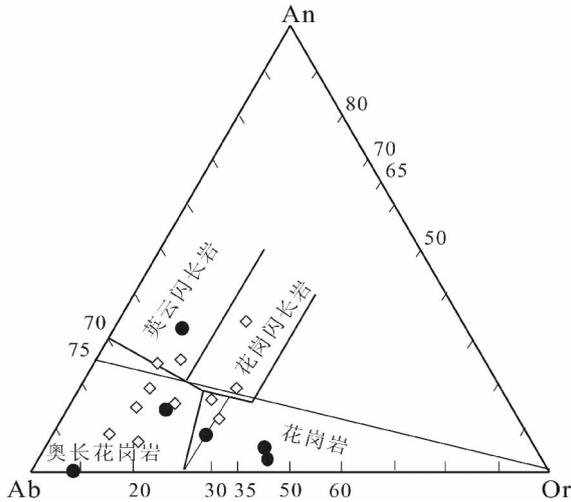


图 5 嵩山地区 TTG 片麻岩 An-Ab-Or 分类图解(据 Barker, 1979; O'Connor, 1965)

●本次工作所测的嵩山地区 TTG 质片麻岩样品; ◇嵩山地区 TTG 片麻岩样品(引自劳子强等, 1996)

Fig. 5 The classification diagram according to An-Ab-Or of TTG gneiss in Songshan area (from Barker, 1979; O'Connor, 1965)

●Our samples of TTG gneiss; ◇TTG gneiss samples in Songshan area (from Lao *et al.*, 1996)

表 2 嵩山地区 TTG 质片麻岩主量(wt%)、微量及稀土元素($\times 10^{-6}$)分析数据

Table 2 Major elements (wt%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) data of TTG gneiss in Songshan area

样品编号	DF-41	DF-24	DF-5	DF-44	DF-48	DF-49
SiO ₂	69.61	70.31	73.71	73.32	67.79	72.25
TiO ₂	0.28	0.23	0.15	0.07	0.31	0.23
Al ₂ O ₃	15.13	15.41	13.72	16.37	15.9	15.17
Fe ₂ O ₃	1.82	1.96	1.82	0.78	3.58	1.75
K ₂ O	3.57	2.26	4.25	1.20	1.38	4.98
MnO	0.03	0.02	0.02	0	0.04	0.01
MgO	0.58	0.55	0.64	0.18	1.34	0.31
CaO	1.39	2.37	0.45	1.19	4.48	0.88
Na ₂ O	5.27	5.56	3.56	6.24	4.16	4.28
P ₂ O ₅	0.06	0.04	0.01	0.01	0.07	0.04
LOI	1.31	1.08	0.88	0.88	0.89	0.80
Total	99.03	99.8	99.21	100.23	99.94	100.69
Na ₂ O/K ₂ O	1.48	2.47	0.84	5.20	3.01	0.86
Fe ₂ O ₃ /MgO	3.14	3.56	2.84	4.33	2.67	5.65
Fe ₂ O ₃ + MgO	2.40	2.51	2.46	0.96	4.92	2.06
Na ₂ O + CaO + K ₂ O	10.23	10.19	8.26	8.63	10.02	10.14
A/NCK	1.00	0.97	1.22	1.19	0.96	1.08
Sc	1.48	2.43	2.34	0.34	8.25	1.31
Ti	1668	1241	757	221	1849	1295
V	16.9	22.1	9.54	3.24	44.1	11.2
Cr	0.28	5.59	0.77	0.32	14.9	0.58
Mn	223	185	141	21.2	359	111
Co	2.56	3.58	1.59	0.43	9.02	1.52
Ni	1.07	4.15	1.35	0.29	18.12	0.27
Cu	2.19	5.08	1.59	15.9	4.99	5.68
Zn	25.2	36.8	16.9	11.6	35.6	25.6
Ga	18.9	20.5	13.2	17.3	17.2	17.2
Ge	1.29	0.62	1.15	0.67	1.01	0.86
Rb	91.7	36.2	116	26.1	52.7	131
Sr	425	642	106	677	380	370
Y	3.93	3.50	17.8	1.29	8.57	2.75
Zr	151	87.7	112	56.2	156	164
Nb	4.35	1.54	5.01	0.54	2.89	2.54
Cs	2.71	0.84	2.21	0.92	1.70	2.92
Ba	953	571	981	694	602	1197
Hf	3.99	2.57	3.50	1.88	4.07	4.43
Ta	0.31	0.11	0.41	0.06	0.16	0.15
Pb	12.9	6.26	11.3	8.98	9.80	19.4
Th	15.5	1.88	27.8	0.28	6.33	27.2
U	2.17	0.55	2.77	0.26	0.47	1.99
Rb/Sr	0.22	0.06	1.10	0.04	0.14	0.35
Sr/Ba	0.46	1.13	0.11	0.97	0.63	0.31
Sr/Y	108	184	5.92	526	44.3	135
La	35.2	14.8	31.7	3.47	257	45.2
Ce	64.7	30.7	50.3	6.34	47.8	79.5
Pr	6.24	3.54	4.47	0.70	4.89	7.79
Nd	19.5	12.6	14.1	2.53	16.2	23.2

续表 2

Continued Table 2

样品编号	DF-41	DF-24	DF-5	DF-44	DF-48	DF-49
Sm	2.41	1.87	2.47	0.43	2.35	2.50
Eu	0.59	0.51	0.37	0.18	0.63	0.59
Gd	1.62	1.24	2.60	0.35	2.06	1.43
Tb	0.16	0.13	0.43	0.04	0.28	0.11
Dy	0.72	0.61	2.75	0.21	1.57	0.43
Ho	0.12	0.11	0.58	0.04	0.31	0.08
Er	0.30	0.25	1.74	10.0	0.78	0.20
Tm	0.04	0.04	0.27	0.02	0.11	0.03
Yb	0.26	0.24	1.84	0.09	0.68	0.22
Lu	0.04	0.04	0.30	0.01	0.10	0.04
ΣREE	132	66.7	114	14.5	104	161
LREE/HREE	39.6	24.1	9.84	16.0	16.6	62.7
(La/Yb) _N	97.8	43.4	12.4	28.0	27.1	148
Sm/Nd	0.12	0.15	0.18	0.17	0.15	0.12
Th/U	10.0	3.45	7.13	1.07	13.5	13.7
(Ce/Yb) _N	70.0	35.0	7.59	19.8	19.5	101
δEu	0.86	0.96	0.45	1.38	0.86	0.88

注: $A/CNK = Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$ (分子比), $\delta Eu = 2Eu / (Sm_N + Gd_N)$

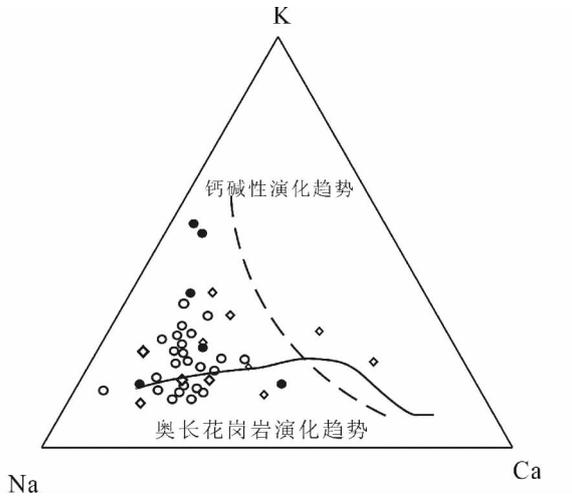


图 6 嵩山地区 TTG 质片麻岩 K-Na-Ca 图解 (据 Barker and Arth, 1976)

●本次工作所测的嵩山地区 TTG 样品: 1-DF-44; 2-DF-48; 3-DF-24; 4-DF-41-3; 5-DF-49-1; 6-DF-5。◇嵩山地区 TTG 片麻岩样品 (引自劳子强等, 1996); ○芬兰太古宙灰色片麻岩中的奥长花岗岩 (引自 Martin, 1987)

Fig. 6 The K-Na-Ca diagram of TTG gneiss in Songshan area

●Our samples of TTG gneiss, 1-DF-44; 2-DF-48; 3-DF-24; 4-DF-41-3; 5-DF-49-1; 6-DF-5; ◇TTG gneiss samples in Songshan Area (from Lao *et al.*, 1996); ○Trondhjemite in Archean grey gneiss in Finland (from Martin, 1987)

个样品的主量元素和 7 个样品的微量元素数据。

本区片麻岩总体特征为富 Na_2O (3% ~ 7%) 和 SiO_2 (>67%) 含量, $Na_2O + K_2O$ 在 5% ~ 10%, Na_2O/K_2O 比值多在 1.5 ~ 5.2, 一些变闪长质岩石的 Na_2O/K_2O 可以略小于 1。英云闪长质片麻岩具低-中 K 组分特征, 花岗闪长质片麻岩具高 K 组分特征 (图 4)。在标准化的 An-Ab-Or 图解 (图 5) 上, 样品基本都落入 O' Connor (1965) 定义的 Sangmelima TTG 区域或在其附近, 其中, DF-44 和 DF-24 落入奥长花岗岩区, DF-48 落入英云闪长岩区, 像 DF-5、DF-49 等 Na_2O/K_2O 比值偏低的样品落入花岗岩区。在 K-Na-Ca 图解 (图 6) 上, 样品显示了奥长花岗岩趋势, 部分样品显示钙碱性演化趋势。 Al_2O_3 含量为 13.72% ~ 16.37%, $A/CNK [Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O) \text{ 分子比}] = 0.97 \sim 1.21$, 平均为 1.03, 显示高铝特征, 与世界上一些地区的高铝 TTG 岩石类似 (Barker and Arth, 1976; Barker, 1979)。贫镁铁质氧化物 ($Fe_2O_3^T + MgO + TiO_2$ 含量 < 6%)。 $Mg^\# [Mg^{2+} / (Mg^{2+} + Fe^T) \times 100]$ 摩尔比, FeO^T 为 Fe^{2+} 变化较大 (7.7 ~ 56.9), 平均为 30.0。在 Harker 图解中 (图 4), 随着 SiO_2 含量增加, $FeO^* + MgO$ 渐次升高, 岩石显示太古宙 TTG 岩系特征。

6.2 微量元素

嵩山地区 TTG 质片麻岩 REE 配分型式图及微量元素蛛网图见图 7、8。

REE 总量偏低 ($\Sigma REE = 14 \times 10^{-6} \sim 161 \times 10^{-6}$), 重稀土元素强烈亏损, LREE/HREE 比值为 9.8 ~ 62.7, La 含量较高 (可达 45.2×10^{-6}), Yb 含量很低 ($0.09 \times 10^{-6} \sim 1.84 \times 10^{-6}$, 平均为 0.52×10^{-6}), 具较高的 $(La/Yb)_N$ 值 (12 ~ 150, 平均为 38.4), $(La/Sm)_N = 3.8 \sim 11.7$, $(Gd/Yb)_N = 1.2 \sim 5.7$, 体现 LREE、HREE 强烈分异的特点。在 $(La/Yb)_N$ -Yb_N 和 Sr/Y-Y 图解中 (图 9a-b), 样品基本落入太古宙 TTG 岩

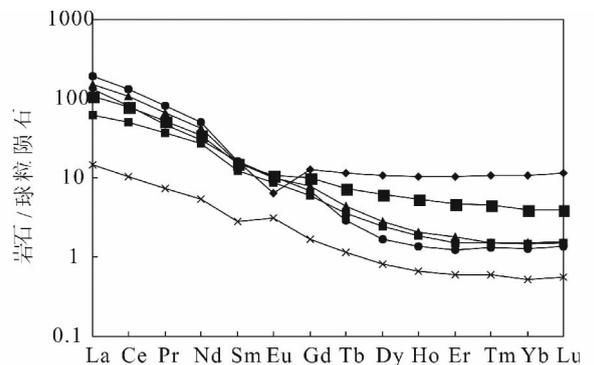


图 7 嵩山地区 TTG 质片麻岩球粒陨石标准化 REE 配分模式图 (球粒陨石标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE pattern of TTG gneiss of Songshan area (chondrite values of Sun and McDonough, 1989)

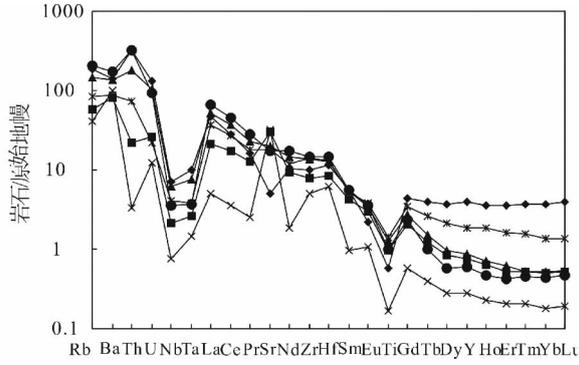


图8 嵩山地区TTG质片麻岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(PM标准值据Sun and McDonough, 1989)

Fig. 8 PM-normalised incompatible element spider pattern of TTG gneiss of Songshan area (PM value of Sun and McDonough, 1989)

区。大部分样品基本无Eu异常(0.85~1.01),出现微弱的Eu正异常(DF-44, $\delta\text{Eu} = 1.38$)和Eu负异常(DF-5, 0.45左右)可能与斜长石的结晶分异有关。

在初始地幔标准化图解中(图8)中,岩石显示负的Nb、Ta和Ti异常,高场强元素Zr和Hf轻微负异常或无异常,Zr/Hf比值约为37,和洋中脊玄武岩及球粒陨石中的Zr/Hf比值接近(37 ± 2 , Davis *et al.*, 2000)。

岩石富Sr(平均 433.2×10^{-6})和Ba,贫Rb,部分样品明显具Sr正异常,但有些样品(如DF-24)Sr正异常不明显。Sr/Y比值高(5.9~525.5),Rb/Sr比值低(0.04~0.35),个别样品的Rb/Sr比较高(如DF-5, 1.1)可能与含有较多斜长石有关,富Cr、Co、Ni等。相比之下,奥长花岗岩-英云闪长岩

的Rb/Sr比值较低,而二长花岗岩Rb/Sr、Ba/Sr比值较高,反映出Rb、Sr、Ba等大离子亲石元素在晚期更富集。Nb/Ta和La/Nb比值较低,分别为14和7左右。岩石的Rb、Y、Nb、Th、Ta、Zr和Yb之间的关系特征和岛弧火山岩相似(图10a-c),高的Th/Yb(平均27.8)与高的La/Yb(>17)显示岩石类似大陆边缘弧长英质岩石(图10c)。岩石的平均Th/U比值(9.64)要比估计的地壳最大Th/U比(3.85)和推算出的不同年龄的火成岩的Th/U比(3.9)要高的多(Galer and O'Nions, 1985),是上地幔该比值的两倍还多(≤ 2.5 , Jochum *et al.*, 1983),如此的Th/U比值,可能为变质作用期间U的不同程度的丢失所造成(Shang *et al.*, 2004)。

6.3 Nd和Hf同位素特征

TTG质片麻岩的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.51057 \sim 0.51178$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t = 2.63\text{Ga})$ 值和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t = 2.53\text{Ga})$ 值分别为2.6~5.7和1.4~4.3, Nd同位素变化不大(表3)。用亏损地幔的线性演化模式计算Nd模式年龄,取($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_{DM} = 0.513151, ($^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$)_{DM} = 0.2137,结果显示四个片麻岩样品DF-5、DF-24、DF-44、DF-49模式年龄分别为2.91Ga、2.66Ga、2.84Ga和2.69Ga,最年轻的模式年龄与所测的TTG岩石岩浆锆石的最大结晶年龄($2624 \pm 47\text{Ma}$)相近。锆石Hf同位素数据见表4,样品的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布于0.281259~0.281368,用上交点年龄($t = 2624\text{Ma}$)计算的初始Hf同位素组成 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 在3.3~8.0,锆石模式年龄 $t_{\text{DM}} = 2.61 \sim 2.79\text{Ga}$, $t_{\text{DMc}} = 2.62 \sim 2.84\text{Ga}$,第一阶段模式年龄和第二阶段模式年龄基本一致,最小模式年龄也和TTG岩石的结晶年龄相近,反映当时的玄武质地壳是初始地壳。

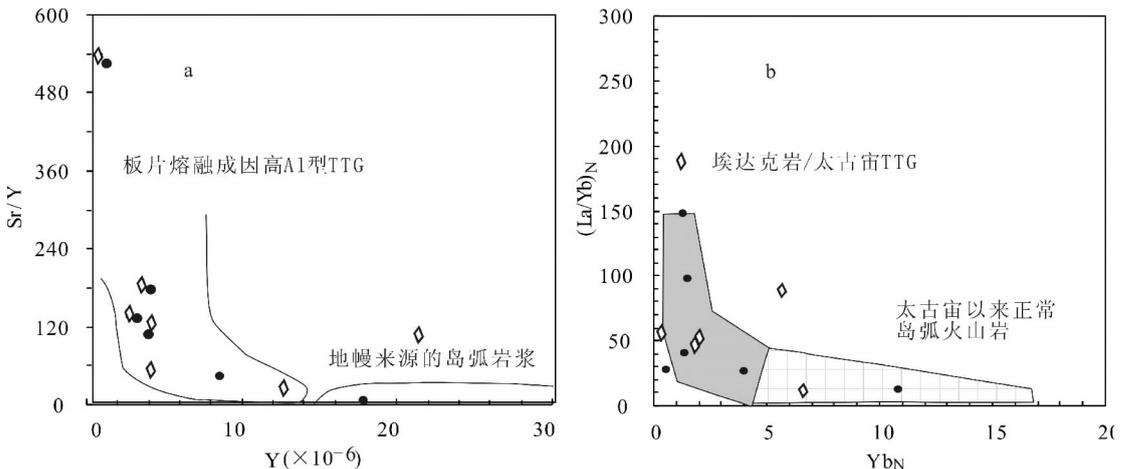


图9 嵩山地区TTG质片麻岩Sr/Y-Y和 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}-\text{Yb}_{\text{N}}$ 关系图解

a中区域划分据Martin (1993, 1994); b中埃达克岩区域,据Atherton and Petford (1993);太古宙TTG区域据Martin (1993, 1994)。●本次工作所测的嵩山地区TTG质片麻岩样品;◇嵩山地区TTG质片麻岩样品(引自劳子强等, 1996)

Fig. 9 Sr/Y-Y and $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}-\text{Yb}_{\text{N}}$ diagrams for TTG gneiss in Songshan area

a-fields from Martin (1993, 1994); b-field of Adakite from Atherton and Petford (1993), field of Archean TTG from Martin (1993, 1994)。●Our samples of TTG gneiss; ◇TTG gneiss samples in Songshan area (from Lao *et al.*, 1996)

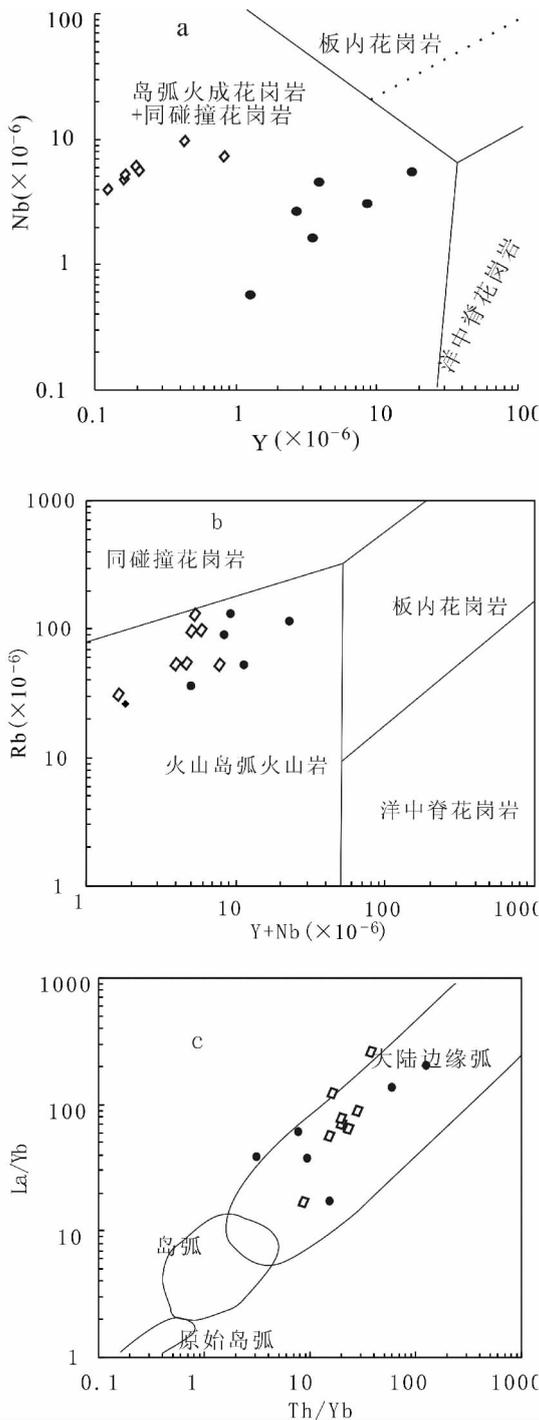


图 10 嵩山地区 TTG 片麻岩地球化学组分环境判别图解
a-Y-Nb; b-Rb-Y + Nb (据 Pearce *et al.*, 1984); c-La/Yb-Th/Yb
(据 Condie, 1989). ● 本次工作所测的嵩山地区 TTG 质片麻岩
样品; ◇ 嵩山地区 TTG 片麻岩样品 (引自劳子强等, 1996)

Fig. 10 Geochemical compositions of Songshan TTG gneiss plotted in the tectonic setting discrimination diagrams a-Y-Nb; b-Rb-Y + Nb (from Pearce *et al.*, 1984); c-La/Yb-Th/Yb (from Condie, 1989). ● Our samples of TTG gneiss; ◇ TTG gneiss samples in Songshan Area (from Lao *et al.*, 1996)

表 3 嵩山地区 TTG 质片麻岩 Nd 同位素分析结果

Table 3 Nd isotopic data of TTG gneiss in Songshan area

样品号	Nd ($\times 10^{-6}$)	Sm ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}}$ (2δ)	$\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}}$	ε_{Nd} (t_1)	ε_{Nd} (t_2)	t_{DM} (Ga)
DF-5	14.130	2.468	0.511178	0.110816	2.6	1.4	2.91
DF-24	12.600	1.873	0.511060	0.148651	5.7	4.3	2.66
DF-44	2.5330	0.425	0.511143	0.106452	3.4	2.1	2.84
DF-49	23.230	2.504	0.510569	0.068389	4.4	2.7	2.69

7 讨论

TTG 岩系主要形成于两种构造环境: 1) 在热的板块构造消减带, 由消减板片的部分熔融形成 (Martin, 1986, 1999; Drummond and Defant, 1990; Peacock *et al.*, 1994; Martin and Moyen, 2002); 2) 在大陆地壳或加厚洋壳底部, 由底侵的含水玄武质岩石部分熔融形成 TTG (Rudnick *et al.*, 1993; Albarède, 1998; Smithies and Champion, 2000; Smithies, 2002)。这两种构造环境代表两种不同的地壳增生模式, 即以洋壳俯冲产生岛弧或安第斯型岩浆作用的陆壳水平增生方式或以岩浆底侵作用为特征的陆壳垂直增生方式。对于华北克拉通, 虽然多数研究者已经倾向于其在古太古代已开始形成陆核, 在新太古代已具有与板块构造原则上类似而规模不同的大陆拼合机制 (Zhai and Windley, 1990; Windley, 1995), 但是否存在古老残留洋壳还有争议 (程裕洪和徐惠芬, 1998; 耿元生和程裕洪, 1998; 翟明国和刘文军, 2001; 李江海等, 2004), 新太古代末地壳增生是垂直模式还是微陆块拼贴或规模较小的板块构造模式还没有确切答案。以下我们将通过对嵩山地区 TTG 质片麻岩的岩石地球化学和同位素特征来讨论其岩石属性、形成机制及构造意义, 为进一步研究华北克拉通初始大陆壳的形成过程和演化机制提供证据。

7.1 岩石属性

该区岩石地球化学特征显示其属于英云闪长岩-奥长花岗岩系列 (图 5、6), 与世界典型 TTG 岩类似 (Barker and Arth, 1976; Barker, 1979, 图 4、7), 并显示新太古代富铝型 TTG 岩石特征 (Martin, 1993, 1994)。

嵩山地区英云闪长岩-奥长花岗岩质片麻岩类与二长花岗质-闪长质片麻岩地球化学特征总体上都具有高铝型 TTG 岩石特征, 但后者钾含量稍高 (图 4)。Gill (1981) 和 Maitre *et al.* (1989) 认为 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 偏低可能与岩性有关, 低-中等含钾量是紫苏花岗岩和英云闪长岩的特征, 中-高等含钾量是花岗闪长岩的特征。在稀土元素特征上, 一般英云闪长岩-奥长花岗岩质片麻岩的 REE 总量偏低、Eu 正异常或无异常和强亏损的 HREE, 而二长花岗质-闪长质片麻岩的 REE 总量较高、Eu 负异常和 HREE 相对富集, 前者可能反映累积了较

表4 嵩山地区 TTG 质片麻岩 Hf 同位素分析数据

Table 4 Hf isotopic data of TTG gneiss in Songshan area

Sample	t_{Ma}	$\frac{^{176}\text{Yb}}{^{177}\text{Hf}}$	$\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}$	$\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}$ (corr)	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM}}(\text{Ga})$	$t_{\text{DMc}}(\text{Ga})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
DF44 01	2455	0.014796	0.000440	0.281271	0.000017	-53.1	5.1	2.72	2.75	-0.99
DF44 02	2455	0.016621	0.000570	0.281259	0.000017	-53.5	4.4	2.75	2.78	-0.98
DF44 03	2455	0.020010	0.000643	0.281364	0.000021	-49.8	8.0	2.61	2.61	-0.98
DF44 04	2455	0.021392	0.000832	0.281368	0.000030	-49.6	7.9	2.62	2.62	-0.97
DF44 05	2455	0.037898	0.001153	0.281277	0.000024	-52.9	4.1	2.77	2.8	-0.97
DF44 06	2455	0.026794	0.000770	0.281283	0.000018	-52.7	4.9	2.73	2.76	-0.98
DF44 07	2455	0.019032	0.000736	0.281236	0.000026	-54.3	3.3	2.79	2.84	-0.98
DF44 08	2455	0.014905	0.000490	0.281311	0.000022	-51.7	6.5	2.67	2.69	-0.99

注: t_{DM} 代表亏损地幔模式年龄, t_{DMc} 代表平均地壳模式年龄, $t = 2.455 \text{ Ga}$; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.0332$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.282772$ (Blichert-Toft and Albarède, 1997), $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.0384$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.28325$ (Griffin *et al.*, 2000), $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{平均地表}} = 0.015$ (Veevers *et al.*, 2005), $\lambda(^{176}\text{Lu}) = 1.867 \times 10^{-11}/\text{a}$ (Soderlund *et al.*, 2004)

多长石组分,高的硅含量可能反映其是熔体或较低部分熔融程度熔体的分馏较强的部分;而后者则反映岩石中含有较多镁铁质矿物相及富含 REE 的副矿物 (Shang *et al.*, 2004)。

7.2 嵩山 TTG 质片麻岩的岩石成因

7.2.1 源岩性质

嵩山地区太古宙 TTG 质片麻岩的微量元素如低的 Rb 含量 ($< 150 \times 10^{-6}$)、Sr 和 O ($\delta^{18}\text{O} = 0.7 \sim 0.9$) 同位素比值,和大洋中脊玄武岩及球粒陨石接近的 Zr/Hf 比值 (34.9) (37 ± 2 , Davis *et al.*, 2000), 较低的 La/Nb 比值 (平均 7), 负的 Nb、Ta 和 Ti 异常,低的 Nb/Ta 比值 (约 14) 与受来自俯冲板片的含水熔体影响的镁铁质岩石的该比值 (约 13) 相似 (Kamber and Collerson, 2000), 这些特征显示该区 TTG 片麻岩的源岩具有岛弧玄武质岩石特征 (Sun and McDonough, 1989) (图 10a-c)。岩石的 Rb、Y、Nb、Th、Ta、Zr 和 Yb 丰度及其比值特征和岛弧或大陆边缘弧岩浆岩相似 (图 10a-c)。 $\varepsilon_{\text{Nd}} = 2.6 \sim 5.7$ 和 $1.4 \sim 4.3$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 3.3 \sim 8.0$, 最年轻的 Nd、Hf 同位素模式年龄 (2.66、2.61 Ga) 与所测的 TTG 岩浆上限结晶年龄 ($2624 \pm 47 \text{ Ma}$) 相近, 同位素数据表明源区可能来自亏损地幔的约 2.66 Ga 的初生地壳。在 Sr/Y-Y 和 (La/Yb)_N-Yb_N 相关图解 (图 9a、b) 中显示该区 TTG 片麻岩源区为太古宙玄武质地壳。

7.2.2 成因机制

很多高温高压实验支持 TTG 岩石是由含水玄武质地壳在足够使石榴石 (榴辉岩或含石榴石的角闪岩) 稳定的压力条件下的低-中等级别的部分熔融产生 (Barker and Arth, 1976; Martin *et al.*, 1983; Kröner, 1986; Rapp *et al.*, 1991; Rapp and Watson, 1995; 熊小林等, 2007)。

嵩山地区 TTG 质片麻岩变质地体中缺少中性火成岩石,也未发现基性堆积岩 (郭安林, 1989), La/Sm-La 具有很好的线性相关性,符合部分熔融特征, Sr/Y-Y 和 (La/Yb)_N-Yb_N 相关图解 (图 11a、b) 显示由榴辉岩部分熔融产生。Nb、Ta、Ti

负异常和 Zr、Hf 轻微负异常特征 (图 7、8) 说明 TTG 源区亏损 HFSE 元素,同时在其形成过程中应该有角闪石、石榴石等对 HREE 分配系数大于 1 并具有 Eu 负异常的矿物的分离或残留 (Hanson, 1978; Barker and Foster, 1981; Green *et al.*, 1994), 弱-无的 Eu 负异常说明残留相中并没有斜长石 (Barker and Arth, 1976)。石榴石稳定说明压力不低于 0.8 GPa, 大约在 700 ~ 1000°C 时, 仅在高压条件下 ($> 1.5 \text{ GPa}$), 镁铁质岩石脱水熔融产生奥长花岗岩熔体, 并具有富 Al 组分, 残余熔体相中富含角闪石和石榴石, 不含斜长石 (如; Rapp *et al.*, 1991), 而且, 只有含水 (大约 5% 的水) 洋壳岩石的部分熔融才能产生此类岩石 (Peacock *et al.*, 1994)。

由此看来, 俯冲环境下含水玄武质洋壳部分熔融 (Martin, 1987) 或者是含水加厚的镁铁质地壳 (约 40 km) 部分熔融都可形成 TTG 岩浆 (Holdaway, 1971; Kay and Kay, 1991; Spear and Martinez-Tarazona, 1993), 并产生石榴石和角闪石残余。而本区 TTG 片麻岩以下岩石学和地球化学特征说明其是在俯冲环境下形成:

1) 本区 TTG 片麻岩具岛弧或大陆边缘弧岩浆岩特征 (Sun and McDonough, 1989, 图 10a-c), 在 Sr/Y-Y 和 (La/Yb)_N-Yb_N 图解中 (图 9a-b) 岩石落入板片熔融成因的高铝型 TTG 区域, Nb/Ta 比值也和受俯冲板片含水熔体影响的镁铁质岩石的该比值相似 (Kamber and Collerson, 2000)。

2) TTG 片麻岩 $\text{Mg}^{\#}$ 值变化较大 (7.71 ~ 56.9), 但均落入较年轻的 TTG 区域 (图 12)。通常大洋中脊拉斑玄武岩的 $\text{Mg}^{\#} < 60$ (平均 51), 由 MORB 部分熔融形成的熔体 $\text{Mg}^{\#}$ 一般不超过 45, 因此, $\text{Mg}^{\#}$ 的大小可以灵敏的反映基性岩熔融产物在上升过程中是否受到地幔物质的混染 (Smithies, 2000; Smithies and Champion, 2000; Shang *et al.*, 2004)。本区闪长质片麻岩表现出高 $\text{Mg}^{\#}$ ($\text{Mg}^{\#}$ 可达 56)、低 SiO_2 的特征, 和俯冲环境下的新生代埃达克岩相似, 在其上升过程中可能受到地幔楔组分的强烈混染 (Shang *et al.*, 2004)。英云闪长

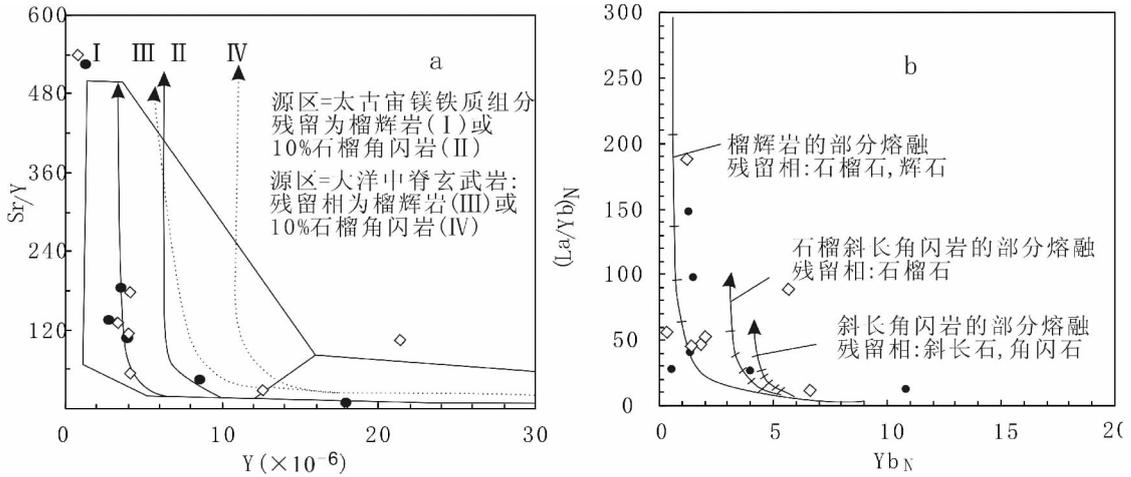


图 11 嵩山地区 TTG Sr/Y-Y 图解(a, 样品与残留相含有石榴石一致, 熔融曲线引自 Drummond and Defant, 1990) 和 Yb_N - $(La/Yb)_N$ 图解(b, 熔融曲线引自田伟等, 2005)

●本次工作所测的嵩山地区 TTG 质片麻岩样品; ◇嵩山地区 TTG 片麻岩样品(引自劳子强等, 1996)

Fig. 11 Sr/Y-Y diagram (a, samples are compatible with garnet-bearing residues, melting curves are from Drummond and Defant, 1990) and Yb_N - $(La/Yb)_N$ diagram (b, melting curves are from Tian *et al.*, 2005) for Songshan TTG

●Our samples of TTG gneiss; ◇TTG gneiss samples in Songshan area (from Lao *et al.*, 1996)

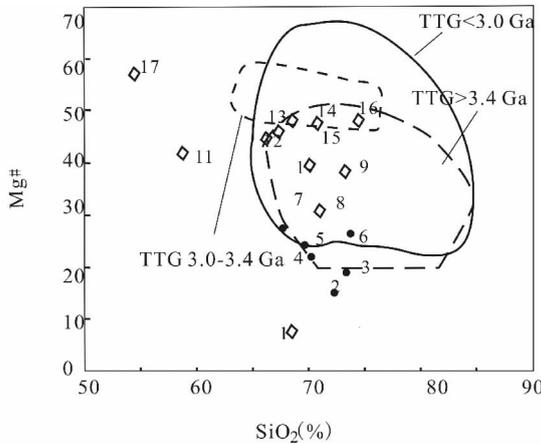


图 12 嵩山地区 TTG 片麻岩体岩石 SiO_2 - $Mg^\#$ 图解(据 Smithies, 2000)

●本次工作所测的嵩山地区 TTG 质片麻岩样品; ◇嵩山地区 TTG 片麻岩样品(引自劳子强等, 1996; 1-H₁; 2-DF-49-1; 3-DF-44; 4-DF-24; 5-DF-41-3; 6-DF-5; 7-DF-48; 8-B₁; 9-N₁; 10-B₂; 11-D₁; 12-D₂; 13-D₃; 14-B₃; 15-W₁; 16-N₂; 17-Q₁)

Fig. 12 SiO_2 - $Mg^\#$ diagrams of Songshan TTG gneisses (from Smithies, 2000)

●Our samples of TTG gneiss; ◇TTG gneiss samples in Songshan area (from Lao *et al.*, 1996)

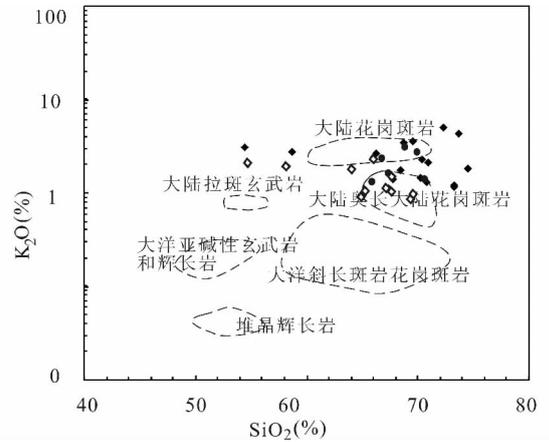


图 13 嵩山地区 TTG 质片麻岩 K_2O - SiO_2 图

●本次工作所测的嵩山地区 TTG 质片麻岩样品; ◇嵩山地区 TTG 片麻岩样品(引自劳子强等, 1996)

Fig. 13 the diagram of K_2O - SiO_2 of TTG gneiss in Songshan area

●Our samples of TTG gneiss; ◇TTG gneiss samples in Songshan area (from Lao *et al.*, 1996)

质、奥长花岗质片麻岩表现出两种情况: 即高 $Mg^\#$ -高 SiO_2 和低 $Mg^\#$ -高 SiO_2 。高 $Mg^\#$ -高 SiO_2 组分与加拿大高级火成岩省中的高铝型 TTG 组分特征相似, 是与地幔楔发生作用的产物 (Feng and Kerrich, 1992)。低 $Mg^\#$ -高 SiO_2 的岩石可能是板

片俯冲近似水平而没能很大程度的和地幔楔发生作用 (Smithies and Champion, 2000; Smithies *et al.*, 2003)。本区 TTG 片麻岩的 $Mg^\#$ 值变化表明是有地幔楔不同程度的卷入的 (Rapp *et al.*, 1999; Smithies, 2000; Martin and Moyen, 2002; Martin, 2005)。在 K_2O/SiO_2 图解中(图 13), TTG 岩石落入大陆奥长花岗岩区, 这说明玄武质洋壳部分熔融产生的 TTG 可能与地幔楔相互作用之后通过地幔楔在地壳中侵位

(Martin, 2005)。

3) Nd、Hf 同位素特征和锆石 Hf 同位素模式年龄计算结果显示, 岩石源区物质可能是来源于约 2.66Ga 亏损地幔的初生地壳。

综上所述, 本区新太古代 TTG 片麻岩和新生代埃达克岩类似 (Drummond and Defant, 1990; Drummond *et al.*, 1996; Rapp, 1997; Martin, 1999), 是在类似古太古代极高热流条件下新生俯冲玄武质洋壳部分熔融形成 (Martin, 1987), 而不是由加厚玄武质地壳部分熔融形成, 而且, 如果是加厚地壳部分熔融形成的熔体一般更富钾 (Martin, 1987), 而本区岩石基本上是富钠低钾, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 一般 >1 。岛弧环境下低角度俯冲系统是一个宽的岛弧系统 (Gutscher *et al.*, 2000), 这也可以解释嵩山地区 TTG 片麻岩大面积出露的特征。

7.3 构造环境及其地质意义

嵩山地区新太古代 TTG 片麻岩岩石组合为一套中-酸性岩浆演化系列, 在造山带中这种岩石组合是岛弧环境产物 (Maniar and Piccoli, 1989; 陈斌和徐备, 1996; 李江海等, 2006), 地球化学特征 (图 10a-c) 接近于显生宙的岛弧或大陆边缘弧环境的岩石地球化学特征 (Maniar and Piccoli, 1989), 在 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ - Yb_N 环境判断关系图解中 (图 9b, 据 Atherton and Petford, 1993) 也多落入埃达克岩区。从构造地质学的角度, 埃达克岩可以作为鉴别消减带的一项岩浆岩标志 (Bourdon *et al.*, 2003)。

有关研究指出, 华北克拉通不同古陆壳 (核) 均具有岛弧属性 (Windley, 1995; Zhai and Windley, 1990; 万渝生等, 1998)。王仁民等 (1991)、王仁民 (1994) 经过相关研究, 推断在中太古代地球上已经出现类似现代板块俯冲消减带和再熔化过程的某些迹象。尽管华北克拉通目前发现的最古老岩石是石英岩或长英质片麻岩, 但初始陆壳的岛弧属性不排除早期陆壳的水平增生方式, 即由一系列岛弧碰撞聚集形成的广阔克拉通陆块这一模式 (Langford and Norin, 1976)。Kröner *et al.* (1998) 也注意到华北表壳岩组合和 TTG 侵入岩形成早于变形和区域变质约 100Ma, 这可用俯冲作用后的碰撞过程来解释。本次工作测出的嵩山地区 TTG 片麻岩形成年龄在 2500~2600Ma, 与前人所测侵入年龄 (王泽九等, 1987, 2004; 劳子强和王世炎, 1999) 基本一致, 越来越多的 TTG 质岩石的侵位说明这一时期的岩浆作用广泛而强烈, 反映在新太古代末曾有一次重大地质事件的存在 (郭安林, 1989; 涂荫玖, 1994; 彭澎和翟明国, 2002)。

所以, 嵩山地区新太古代 TTG 片麻岩的侵入, 代表了一次重要的陆壳水平增生过程。这可能说明华北克拉通南缘在随后的 2.5Ga 左右发生过一次重要的微陆块碰撞拼合事件, 而且, 在不同陆块碰撞拼合之前陆块之间很可能被一个古大洋所分隔, TTG 则是碰撞拼合前俯冲洋壳部分熔融的产物, 该时期的嵩山地区应该处于类似现代大陆边缘弧的构造环境。

8 结论

(1) 嵩山地区 TTG 质片麻岩主、微量元素特征显示其是一套高铝的 TTG 质片麻岩套。锆石 SHRIMP 年龄显示其形成于 2600~2500Ma 左右。英云闪长岩-奥长花岗岩和二长花岗质-闪长质片麻岩的 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 和稀土元素特征稍有差别, 可能因为后者含有较多镁铁质矿物相及富含 REE 的副矿物。

(2) 岩石矿物组合、地球化学和同位素特征显示, 该区 TTG 片麻岩与岛弧或大陆边缘弧玄武质岩石特征相似, $\text{Mg}^\#$ 大小反映存在地幔楔不同程度的混染, 全岩 Nd 和锆石 Hf 同位素数据表明, 岩石源区是来自亏损地幔的约 2.66Ga 的初生地壳; 嵩山地区 TTG 质片麻岩和埃达克岩相似, 是在较高温度和压力 (约 700~1000°C, $>1.5\text{GPa}$) 下由俯冲的含水玄武质洋壳部分熔融形成, 残留相中有石榴石和角闪石而不含斜长石。

(3) 嵩山地区 TTG 片麻岩的俯冲玄武质洋壳部分熔融这一成因表明当时陆壳以水平方式增生, 也说明在随后的 2.5Ga 左右华北克拉通存在微陆块碰撞拼合事件, 而且在不同陆块碰撞拼合之前陆块之间很可能被一个古大洋所分隔, TTG 片麻岩可能就是 2.5Ga 左右微陆块碰撞拼合前俯冲洋壳部分熔融的产物。

致谢 论文写作工作中得到陈衍景研究员的指导, 评审专家翟明国研究员、李江海教授和吴春明教授对本文进行了评审并提出指导意见, 谨此一并致谢。

References

- Atherton MP and Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362: 144–146
- Albarède F. 1998. The growth of continental crust. *Tectonophysics*, 296: 1–14
- Belousova EA, Griffin WL, O' Reilly SY and Fisher NI. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineral and Petrology*, 143: 602–622
- Barker F and Arth JG. 1976. Generation of trondhjemitic-tonalitic liquids and Archaean bimodal trondhjemite-basalt suites. *Geology*, 4: 596–600
- Barker F. 1979. Trondhjemites; Definition, environment and hypotheses of origin. In: Barker (ed.). *Trondhjemites, Dacites and Related Rocks*. Amsterdam: Elsevier, 1–11
- Barker JA and Foster SSD. 1981. A diffusion exchange model for solute movement in fissured porous rock. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. Geological Society of London, 17–24
- Blichert-Toft J 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: 243–258
- Bourdon E, Eissen JP, Gutscher MA, Monzier M, Minard LH and Cotten J. 2003. Magmatic response to early aseismic ridge subduction: The Ecuadorian margin case (South America). *Earth and Planetary Science Letters*, 208: 123–138
- Chen B and Xu B. 1996. The main characteristics and tectonic

- implications of two kinds of Paleozoic granitoids in Sunidzuqi, central inner Moggolia. *Acta Petrologica Sinica*, 12 (4): 546 – 561 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Fu SG, Hu SX, Chen ZM, Zhou SZ, Lin QL and Fu GH. 1989. The Shipaihe Movement and the disassembly of “Dengfeng Group”. *Journal of Stratigraphy*, 13 (2): 81 – 87 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Fu SG, Hu SX, Chen ZM and Zhou SZ. 1990. The basal conglomerate inner of “Dengfeng Group” and the tectonic evolution of Dengfeng granite-green complex. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 5 (3): 9 – 21 (in Chinese with English abstract)
- Cheng YQ and Xu HF. 1998. The Two Geological Problems About the Yanling Formation in Xintai, Shandong Province. The memoir of Precambrian research of North China Craton. Beijing: Geological Publishing House, 39 – 59 (in Chinese)
- Chu NC, Taylor RN, Chavagnac V, Nesbitt RW, Boella RM, Mitton JA, German CR, Bayon G and Burton K. 2002. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric interference corrections. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 17: 1567 – 1574
- Compston W, Williams IS and Meyer C. 1984. U-Pb geochronology of zircons from lunar breccia 73217 using a sensitive high mass resolution ion microprobe. *Journal of Geophysical Research*, 89 (Supplement): B325 – B534
- Condie KC. 1989. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archaean-Proterozoic boundary: Identification and significance. *Lithosphere*, 23: 1 – 18
- Condie KC. 2005. TTGs and adakites: Are they both slab melts? *Lithosphere*, 79: 33 – 44
- Davis W, Hamner S, Aspler L, Sabdenab H and Tella S. 2000. Regional differences in the Neoproterozoic crustal evolution of the Western Churchill Province: Can we make sense of it? Geological Association of Canada Mineralogical Association of Canada Joint Annual Meeting, Calgary
- Deng JF and Wu ZX. 1999. Precambrian granitic rocks continental crustal evolution and craton formation of the North China Platform. *Acta Petrologica Sinica*, 15 (2): 190 – 198 (in Chinese with English abstract)
- Drummond MS and Defant MJ. 1990. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archaean to modern comparisons. *Journal of Geophysical Research*, 95: 21503 – 21521
- Drummond MS, Defant MJ and Kepezhinskas PK. 1996. Petrogenesis of slab-derived trondhjemite-tonalite-dacite/adakite magmas. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 87: 205 – 215
- Feng R and Kerrich R. 1992. Geochemical evolution of granitoids from the Archaean Abitibi Southern Volcanic Zone and the Pontiac subprovince, Superior Province, Canada: Implications for tectonic history and source regions. *Chemical Geology*, 98: 23 – 70
- Galer SLG and O’Nions RK. 1985. Residence time of thorium, uranium and lead in the mantle with implications for mantle convection. *Nature*, 316: 778 – 782
- Geng YS and Cheng YQ. 1998. The basic volcanic rocks event and the Precambrian evolution of the north of Hebei area. In: Chen YQ (ed.). *The Memoir of Precambrian Research of North China Craton*. Beijing: Geological Publishing House, 92 – 104 (in Chinese)
- Gill JB. 1981. Orogenic andesites and plate tectonics. In: Wyllie PJ (ed.). *Springer, Heidelberg*. New York: Minerals and Rocks, 16: 390
- Green NL, Mount and Helens St. 1994. Potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc: Comment. *Geology*, 22: 188 – 189
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, Achterbergh EV, O’Reilly Suzanne Y and Shee SR. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LA-MC-ICPMS analysis of zircon magacysts in kimberlites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 133 – 147
- Guo AL. 1989. The geochemistry characteristics and the origin of grey gneiss of Dengfeng granite-green complex in the center of Henan Province. *Mineral and Rocks*, 9 (2): 92 – 100 (in Chinese)
- Gutscher MA, Maury R, Eissen JP and Bourdon E. 2000. Can slab melting be caused by flat subduction? *Geology*, 28: 535 – 538
- Hanson GN. 1978. The application of trace elements to the petrogenesis of granitic composition. *Earth and Planetary Science Letters*, 38: 26 – 43
- Holdaway MJ. 1971. Stability of andalusite and the aluminium phase diagram. *America Journal of Science*, 271: 97 – 131
- Hoskin PWO and Black LP. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *Journal of Metamorphic Geology*, 18: 423 – 439
- Jahn BM, Glikson AY, Peucat JJ and Hickman AH. 1981. REE geochemistry and isotopic data of Archaean silica volcanics and granitoids from the Pilbara Block, western Australia: Implications for the early crustal evolution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 45: 1633 – 1652
- Jahn BM and Zhang ZQ. 1984. Archean granulite gneisses from Eastern Hebei Province, China: Rare Earth Geochemistry and tectonic implications. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 85: 224 – 249
- Jackson MG. 2005. Holocene loess deposition in Iceland: Evidence for millennial-scale atmosphere-ocean coupling in the North Atlantic. *Geology*, 33: 509 – 512
- Jochum KP, Hofmann AW, Ito E, Seufert HM and White WM. 1983. K, U and Th in mid-ocean ridge basalt glasses and heat production, K/U and K/Rb in the mantle. *Nature*, 306: 431 – 436
- Kamber BS and Collerson KD. 2000. Role of “hidden” deeply subducted slabs in mantle depletion. *Chemical Geology*, 166: 241 – 254
- Kamunzu AB, Tombale AR, Zhai M, Bagai Z, Majaule T and Modisi MP. 2003. Major and trace element geochemistry of plutonic rocks from Francistown, NE Botswana: Evidence for a Neoproterozoic continental active margin in the Zimbabwe craton. *Lithosphere*, 71: 431 – 460
- Kay RW and Kay SM. 1991. Creation and destruction of lower continental crust. *Geologische Rundschau*, 18: 259 – 278
- Kröner A. 1986. Dome structure and basement reaction in the Pan-African Damara belt of Namibia. In: Kröner A *et al.* (ed.). *Precambrian Tectonics Illustrated Germany Stuttgart*, 191 – 206
- Kröner A, Cui WY, Wang SQ and Wang CQ. 1998. Single zircon ages from high-grade rocks of the Jianping complex, Liaoning Province, NE China. *Journal of Asia Earth Science*, 1: 519 – 532
- Langford FF and Norin JA. 1976. The development of the superior province of northwestern Ontario by merging island arcs. *American Journal of Science*, 276: 1023 – 1034
- Lao ZQ. 1989. The section plane characteristics and division of Dengfeng Group. *Henan Geology*, 7 (3): 20 – 26 (in Chinese)
- Lao ZQ, Wang SY, Zhang L, Gong YS and Zhou HW. 1996. *The Precambrian Geological Characteristics and Evolution*. Beijing: Environmental Science Press, 87 – 95 (in Chinese with English abstract)
- Lao ZQ and Wang SY. 1999. The new research progress of Dengfeng Group in Songshan area, Henan Province. *Regional Geology of China*, 18 (1): 9 – 16 (in Chinese)
- Li JH, Qiu XL, Kusky T and Polat A. 2004. Neoproterozoic plate tectonic evolution of North China and its correlation with global cratonic blocks. *Earth Science Frontiers*, 11 (3): 273 – 280 (in Chinese with English abstract)
- Li JH and Qiu XL. 2006. The early Precambrian tectonic evolution of continental craton: A case study from North China. *Earth Science- Journal of China University of Geosciences*, 31 (3): 285 – 293 (in Chinese with English abstract)
- Liang XR, Wei GJ, Li XH and Liu Y. 2003. Precise measurement of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and Sm/Nd ratios using multiple-collectors inductively coupled plasma-mass spectrometer (MC-ICPMS). *Geochimica*, 32 (1): 91 – 96 (in Chinese)

- Liu DY, Nutman AP, Compston W, Wu JS and Shen QH. 1992. Remnants of 3800Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton. *Geology*, 20: 339 – 342
- Maitre L, Walter R, Batrman ED, Dudek P, Keller A, Lameyre J, Le Bas J, Sabine MJ, Schmid PA, Sorensen R, Streckeisen H, Woolley A and Zanettin AR. 1989. A classification of igneous rocks and glossary of terms, recommendations of the International Union of Geological Science, Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Blackwell Scientific. Oxford. GB, 130 – 171
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 101: 635 – 643
- Martin H, Chauvel C and Jahn BM. 1983. Major and trace element geochemistry and crustal evolution of granodioritic Archaean rocks from eastern Finland. *Precambrian Research*, 21: 159 – 180
- Martin H. 1986. Effect of steeper Archean geothermal gradient on geochemistry of subduction-zone magmas. *Geology*, 14: 753 – 756
- Martin H. 1987. Petrogenesis of Archaean trondhjemites, tonalities and granodiorites from Eastern Finland; Major and trace element Geochemistry. *Journal of Petrology*, 28: 921 – 953
- Martin H. 1993. The mechanism of petrogenesis of the Archaean continental crust-comparison with modern processes. *Lithosphere*, 30: 373 – 388
- Martin H. 1994. The Archean grey gneisses and the genesis of the continental crust. In: *Condie KC (ed.). The Archean Crustal Evolution, Developments in Precambrian Geology.* Amsterdam: Elsevier, 205 – 259
- Martin H. 1999. The adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids. *Lithosphere*, 46: 411 – 429
- Martin H and Moyen JF. 2002. Secular changes in TTG composition as markers of the progressive cooling of the Earth. *Geology*, 30: 319 – 322
- Martin H. 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid; Relationships and some implications for crustal evolution. *Lithosphere*, 79: 1 – 24
- O'Connor JT. 1965. A classification for quartz-rich igneous rock based on feldspar ratios. *U. S. Geol. Sur. Prof. Paper*, 525: B79 – B84
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25: 956 – 983
- Peacock SM, Rushmer T and Thompson AB. 1994. Partial melting of subducting oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 121: 227 – 244
- Peng P and Zhai MG. 2002. Two major Precambrian geological events of North China Block (NCB) characteristics and property. *Advance in Earth Sciences*, 7(6): 818 – 825 (in Chinese with English abstract)
- Rapp RP. 1997. Heterogeneous source regions for Archaean granitoids. In: *De Wit MJ and Ashwal LD (eds.). Greenstone Belts.* Oxford University Press, 267 – 279
- Rapp RP, Watson EB and Miller CF. 1991. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archaean trondhjemites and tonalites. *Precambrian Research*, 51: 1 – 25
- Rapp RP and Watson EB. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8 ~ 32 kbar: Implications for continental growth and crust mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36: 891 – 931
- 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: 335 – 356
- Rudnick RL, McDonough WF and Chappell BW. 1993. Carbonate metasomatism in the northern Tanzanian mantle; Petrographic and geochemical characteristics. *Earth and Planetary Science Letters*, 114: 463 – 475
- Shang CK, Satir M, Siebel W, Siebel W, Nsifa EN, Taubald H, Li geois JP and Tchoua FM. 2004. TTG magmatism in the Congo craton: A view from major and trace element geochemistry. Rb-Sr and Sm-Nd systematics; Case of the Sangmelima region, Ntem complex, southern Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 40: 61 – 79
- Shen QH, Xu HF, Zhang ZQ, Gao JF, Wu JS and Ji CL. 1992. The Early Precambrian Granulites in China. Beijing: Geological Publishing House, 389 – 400 (in Chinese with English abstract)
- Shen QH and Qian XL. 1995. Archaean rock associations, episodes and tectonic evolution of China. *Acta Geoscientia Sinica*, 2: 113 – 120 (in Chinese with English abstract)
- Smithies RH. 2000. The Archaean tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite. *Earth and Planetary Science Letters*, 182: 115 – 125
- Smithies RH and Champion DC. 2000. The Archaean high-Mg diorite suite: Links to tonalite-trondhjemite-granodiorite magmatism and implications for early Archaean crustal growth. *Journal of Petrology*, 41: 1653 – 1671
- Smithies RH. 2002. Archaean boninite-like rocks in an intracratonic setting. *Earth and Planetary Science Letters*, 197(1 ~ 2): 19 – 34
- Smithies RH, Champion DC and Cassidy KF. 2003. Formation of Earth's early Archaean continental crust. *Precambrian Research*, 127: 89 – 101
- Song B, Zhang YH, Wan YS and Jian P. 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating. *Geological Review*, 48 (Supplement): 26 – 30 (in Chinese with English abstract)
- Soderlund U, Patchett PJ, Vervoort JD and Isachsen CE. 2004. The ¹⁷⁶Lu decay constant determined by Lu-Hf isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219: 311 – 324
- Spears DA and Martinez-Tarazona MR. 1993. Geological and mineralogical characteristics of a power station feed-coal, Eggborough, England. *International Journal of Coal Geology*, 22: 1 – 20
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: *Saunders SD and Norry MJ (eds.). Magmatism in Ocean Basins.* Geol. Soc. London. Spec. Pub, 42: 313 – 345
- Tian W, Liu SW, Liu CH, Yu SQ, Li QG and Wang YR. 2005. The zircon SHRIMP geochronology and geochemistry: Geology implications of TTG in Sushui Complex, Zhongtiao Shan. *Progress in Nature Science*, 15(12): 1476 – 1484 (in Chinese)
- Tu YJ. 1994. On the late Archean TTG-gneiss in the north Jianghuai area. *Geology of Anhui*, 4(4): 15 – 23 (in Chinese with English abstract)
- Veevers JJ, Saeed A, Belousova EA and Griffin WL. 2005. U-Pb ages and source composition by Hf-isotope and trace-element analysis of detrital zircons in Permian sandstone and modern sand from southwestern Australia and a review of the paleogeographical and denudational history of the Yilgarn craton. *Earth Science Reviews*, 68: 245 – 279
- Wan YS, Geng YS and Wu JS. 1998. The geochemical characteristics of early Precambrian basaltic rocks in North China Craton. In: *Chen YQ (ed.). The Memoir of Precambrian Research of North China Craton.* Beijing: Geological Publishing House, 39 – 59 (in Chinese)
- Wang HZ. 1997. Speculations on earth's rhythms and continental dynamics. *Earth Science Frontiers*, 4(3 – 4): 1 – 12 (in Chinese with English abstract)
- Wang RM, Chen ZZ and Chen F. 1991. Grey tonalitic gneiss and high-pressure granulite inclusions in Hengshan, Shanxi Province, and the geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 7(4): 36 – 45 (in Chinese with English abstract)
- Wang RM. 1994. Two types of Archaean grey gneiss in North China and their geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 68(2): 119 – 131 (in Chinese with English abstract)
- Wang ZJ, Shen QH and Jin SW. 1987. Petrology, geochemistry and U-Pb isotopic dating of the Shipaihe "Metadiorite Mass" in Dengfeng County, Henan Province. Beijing: Bulletin of the Chinese Academy of Geological Science, 16: 215 – 225 (in Chinese)
- Wang ZJ, Shen QH and Wan YS. 2004. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Shipaihe "Metadiorite Mass" from Dengfeng County, Henan Province. *Acta Geoscientia Sinica*, 25(3): 295 – 298 (in Chinese with English abstract)

- Williams IS, Buick IS and Cartwright I. 1996. An extender episode of early Mesoproterozoic metamorphic fluid flow in the Reynolds Range, central Australia. *Journal of Metamorphic Geology*, 14: 29–47
- Windley BF. 1995. *The Evolving Continents* (3Ed). John Wiley and Sons, New York. Chichester, 526
- Wu JS, Geng YS, Shen QH, Wan YS, Liu DY and Song B. 1998. *Archean Geology Characteristics and Tectonic Evolution of Sino Korea Paleo Continent*. Beijing: Geological Publishing House, 105–136 (in Chinese)
- Xiong XL, Han JW and Wu JH. 2007. Phase equilibrium and trace element partitioning between minerals and melt in the metabasalt system: Constraints on the formation conditions of TTG/Adakite magmas and the growth of early continental crust. *Earth Science Frontiers*, 14(2): 151–158 (in Chinese with English abstract)
- Xu P, Wu RY, Xie LW and Yang YH. 2004. Hf isotopic compositions of the standard zircons for U-Pb dating. *Chinese Science Bulletin*, 49: 1642–1648
- Zhang BS. 1951. Songyang Movement and Wutai System. *Geological Review*, 79–81 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Zhou DW and Zhou LF. 1982. The basic characteristics of Pre-Songshan Group Paleostucture in Song-Ji area. Xi'an; *Journal of Northwest Univerty (the album of Precambrian geology)*, 12–22 (in Chinese)
- Zhai MG and Windley BF. 1990. The Archaean and early Proterozoic banded iron formations of North China; Their characteristics geotectonic relations chemistry and impacions for crustal growth. *Precambrian Research*, (48): 267–286
- Zhai MG and Bian AG. 2000. Neoafrican supercontinent collage and Paleoproterozoic-Mesoproterozoic break-up of North China Craton. *Science in China (series D)*, 129–137 (in Chinese)
- Zhai MG and Guo JH. 1992. The discovery and pilot study of eclogite-high-pressure granulite in North of China. *Science in China (series D)*, 12: 1325–1330 (in Chinese)
- Zhai MG and Li JH. 1995. The discovery and implications of Archean retrogressive metamorphic eclogite in the north of China. *Chinese Science Bulletin*, 17: 1590–1594 (in Chinese)
- Zhai MG and Liu WJ. 2001. The formation of granulite and its contribution to evolution of the continental crust. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 28–37 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZH. 1997. *Trace Elements Geochemical Theory*. Beijing: Science Press, 20–150 (in Chinese)
- 劳子强, 王世炎, 张良, 宫银山, 周汉文. 1996. 嵩山地区前寒武纪地质构造特征与演化. 北京: 中国环境科学出版社, 87–95
- 劳子强, 王世炎. 1999. 河南省嵩山地区登封群研究的新进展. *中国区域地质*, 18(1): 9–16
- 李江海, 牛向龙, Kusky T, Polat A. 2004. 从全球对比探讨华北克拉通早期地质演化与板块构造过程. *地学前缘*, 11(3): 273–280
- 李江海, 牛向龙, 程素华, 钱祥麟. 2006. 大陆克拉通早期构造演化历史探讨: 以华北为例. *地球科学*, 31(3): 285–293
- 梁细荣, 韦刚建, 李献华, 刘颖. 2003. 利用 MC-ICPMS 精确测定 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 Sm/Nd 比值. *地球化学*, 32(1): 91–96
- 彭澎, 翟明国. 2002. 华北陆块前寒武纪两次重大地质事件的特征和性质地球科学进展. *地球科学进展*, 7(6): 818–825
- 沈其韩, 徐惠芬, 张宗清, 高吉凤, 伍家善, 吉成林. 1992. 中国前寒武纪麻粒岩. 北京: 地质出版社, 389–400
- 沈其韩, 钱祥麟. 1995. 中国太古宙地质体组成, 阶段划分和演化. *地球学报*, 2: 113–120
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 2002. 锆石 SHRIMP 靶制作、年龄测定及有关现象讨论. *地质评论*, 48(增刊): 26–30
- 田伟, 刘树文, 刘超辉, 余盛强, 李秋根, 王月然. 2005. 中条山涑水杂岩中 TTG 系列岩石的锆石 SHRIMP 年代学和地球化学及其地质意义. *自然科学进展*, 15(12): 1476–1484
- 涂荫玖. 1994. 江淮地区北部晚太古宙 TTG 质片麻岩. *安徽地质*, 4(4): 15–23
- 万渝生, 耿元生, 伍家善. 1998. 华北克拉通早前寒武纪玄武质岩石的地球化学特征. 见: 程裕淇主编: 华北地台早前寒武纪地质研究论文集. 北京: 地质出版社, 39–59
- 王鸿祯. 1997. 地球的节律与大陆动力学的思考. *地学前缘*, 4(3–4): 1–12
- 王仁民, 陈珍珍, 陈飞. 1991. 恒山灰色片麻岩和高压麻粒岩包体及其地质意义. *岩石学报*, 7(4): 36–45
- 王仁民. 1994. 华北太古宙两类灰色片麻岩及其地质意义. *地质学报*, 68(2): 119–131
- 王泽九, 沈其韩, 金守文. 1987. 河南登封群石牌河“变闪长岩体”的部分岩石学和地球化学以及 U-Pb 同位素年龄. 北京: 中国地质科学院院报, (16): 215–234
- 王泽九, 沈其韩, 万渝生. 2004. 河南登封石牌河“变闪长岩体”的锆石 SHRIMP 年代学研究. *地球学报*, 25(3): 295–298
- 伍家善, 耿元生, 沈其韩, 万渝生, 刘敦一, 宋彪. 1998. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化. 北京: 地质出版社, 160–184
- 熊小林, 韩江伟, 吴金花. 2007. 变质玄武岩体系平衡及矿物-熔体微量元素分配: 限定 TTG/埃达克岩形成条件和大陆壳生长模型. *地学前缘*, 14(2): 151–158
- 张伯声. 1951. 嵩阳运动和嵩山区的五台系. *地质评论*, 79–81
- 张国伟, 周鼎武, 周立法. 1982. 嵩箕地区前嵩山群古构造基本特征. 西安: 西北大学学报(前寒武纪地质专集), 12–22
- 翟明国, 卞爱国. 2000. 华北克拉通新太古代束超大陆拼合及古元古代末-中元古代裂解. *中国科学(增刊)*, 129–137
- 翟明国, 郭敬辉. 1992. 中国华北太古宙高压麻粒岩的发现及其初步研究. *中国科学(B)*, 12: 1325–1330
- 翟明国, 李江海. 1995. 华北克拉通发现退变榴辉岩. *科学通报*, 17: 1590–1594
- 翟明国, 刘文军. 2001. 麻粒岩的形成及其对大陆地壳演化的贡献. *岩石学报*, 17(1): 28–37
- 赵振华. 1997. 微量元素地球化学原理. 北京: 科学出版社, 20–150

附中文参考文献

- 陈斌, 徐备. 1996. 内蒙古苏左旗地区古生代两类花岗岩类的基本特征和构造意义. *岩石学报*, 12(4): 546–561
- 陈衍景, 富士谷, 胡受奚, 陈泽铭, 周顺之, 林潜龙, 符光宏. 1989. 石牌河运动与“登封群”的解体. *地层学杂志*, 13(2): 81–87
- 陈衍景, 富士谷, 胡受奚, 陈泽铭, 周顺之. 1990. “登封群”内部的底砾岩和登封花岗-绿岩地体的构造演化. *地质找矿论丛*, 5(3): 9–21
- 程裕淇, 徐惠芬. 1998. 关于山东新泰雁翎关组的两个地质问题. 见: 程裕淇主编. 华北地台早前寒武纪地质研究论文集. 北京: 地质出版社, 39–59
- 邓晋福, 吴宗絮. 1999. 华北地台前寒武纪花岗岩类、陆壳演化与克拉通形成. *岩石学报*, 15(2): 190–198
- 耿元生, 程裕淇. 1998. 冀东地区早前寒武纪基性火山岩事件及早前寒武纪的演化. 见: 程裕淇主编. 华北地台早前寒武纪地质研究论文集. 北京: 地质出版社, 92–104
- 郭安林. 1989. 河南中部太古宙登封花岗-绿岩地体中灰色片麻岩地球化学特征及其成因. *矿物岩石*, 9(2): 92–100
- 劳子强. 1989. 登封群剖面特征及其划分. *河南地质*, 7(3): 20–26