

华北克拉通北缘尚义地区新太古代 TTG 成因分析： 洋壳玄武岩不同深度下熔融的产物

李孟江^{1,2}, 王仁民³, 张 莉¹

LI Meng-jiang^{1,2}, WANG Ren-min³, ZHANG Li¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

1. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510640 Guangdong, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

摘要: 尚义玄武岩为尚义-赤城新太古代洋壳残片的组成端元, 地球化学性质指示其源于富集地幔。根据稀土元素分配特征, 尚义玄武岩可被分为 TH1 型(稀土元素平坦型)和 TH2 型(稀土元素分异型)。尚义 TTG 属于中钾偏铝质钙碱性岩类, 其 Al_2O_3 含量与低铝型 TTG 相近, 同时微量元素 Rb、Sr、Y 和 REE 表现出俯冲板片熔融成因的埃达克岩的性质。根据主量元素 SiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 、 Al_2O_3 和微量元素 Rb、Sr、Y、REE 等指标判别和微量元素平衡熔融模式计算得出, 尚义 TTG 形成压力遍及低压—高压范围, 是洋壳玄武岩(TH1 型)在深度压力变化的条件下部分熔融形成的, 其中的低铝型 TTG 形成于低压熔融。

关键词: 华北克拉通; 尚义地区; 新太古代; TTG; 洋壳玄武岩

中图分类号: P541

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2012)05-0686-10

Li M J, Wang R M, Zhang L. The genesis of Neoarchean TTG in the Shangyi area of the northern margin of North China Craton: melt from basalt of oceanic crust at varying depth. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(5): 686-695

Abstract: Shangyi basalt is a component part of Neoarchean oceanic crust in Shangyi-Chicheng fault zone, and its geochemical characteristics suggest an enriched mantle source. The basalt can be divided into two types: TH1 (Flat-REE) and TH2 (Fractionated-REE). Shangyi TTG is mainly of the medium-potassium, metaluminous and calc-alkaline type, and similar to low- Al_2O_3 TTG owing to its low Al_2O_3 content. In addition, Shangyi TTG shows features of adakite by slab melting according to trace elements Rb, Sr, Y and REE. Based on features of major and trace elements (SiO_2 , K_2O , Na_2O , Al_2O_3 , Rb, Sr, Y, REE) and trace element equilibrium melting calculation, the authors have reached the conclusion that Shangyi TTG was formed throughout the low-high pressure range and was probably produced from partial melting of oceanic crust basalts (TH1 type) at varying depth, with the low- Al_2O_3 type formed under low pressure.

Key words: North China Craton; Shangyi area; Neoarchean; TTG; oceanic crust basalt

华北克拉通是全球最古老的克拉通之一, 具有 38 亿年漫长的演化历史, 太古宙时经历了 3.0Ga 以前的陆核和微陆块形成, 2.7~2.9Ga 陆壳增生, 2.5Ga

岩浆、变质作用过程, 其中很大部分(约 50%)的太古宙岩石为 TTG(奥长花岗岩-英云闪长岩-花岗闪长岩)片麻岩^[1-3]。对于华北克拉通化的完成时代至

收稿日期: 2011-05-16; 修订日期: 2012-02-27

资助项目: 国家自然科学基金项目《冀西北太古宙锆玄武岩岩石组合的构造环境研究》(批准号: 40972125)

作者简介: 李孟江(1986-), 在读硕士, 从事前寒武纪地质研究。E-mail: limengjiang1986@126.com

今存在争议,有学者^[4-8]认为是新太古代(2.5Ga),不同于赵国春等^[9-12]所认为的古元古代(1.85Ga),但可以确定华北克拉通在新太古代时发生了广泛的岩浆热事件^[13-15]。本文将对华北克拉通北缘中段出露的新太古代尚义 TTG 进行成因研究,进而推测华北克拉通太古宙地壳演化的特征。

目前多数学者认为,华北克拉通新太古代时演化为微陆块拼贴或小规模的板块构造模式^[2,4-5,16-19]。Wang 等^[20]认为华北克拉通北缘中段尚义-赤城古断裂带中的岩石组合为新太古代俯冲古洋壳残片,并将其中的玄武岩分为 TH1 型(稀土元素平坦型)和 TH2 型(稀土元素分异型)。因尚义 TTG 与古洋壳残片同地产出,本文试图分析两者之间的成因联系。

1 区域地质背景

华北克拉通北缘中段是中国重要的前寒武纪地区,保存着从太古宙—古元古代较完整的变质基底记录,对研究华北克拉通的形成与演化具有重要意义^[21]。该区域主要由变质基底、未变质盖层和不同时期的各类侵入体组成。其中,变质基底由太古宙—古元古代的单塔子杂岩、崇礼群、怀安杂岩、孔兹岩系和红旗营子杂岩构成;各类侵入体则包括古元古代末期未变质的辉长岩—闪长岩—斜长岩—碱性花岗岩—环斑花岗岩组合、晚古生代—中生代的超基性—基性侵入体组合和闪长质—花岗质侵入体;未变质盖层多为中生代火山岩、火山沉积岩和中元古代—古生代的沉积层^[22]。

以尚义—赤城断裂为界,华北克拉通北缘中段可被划分为两大构造单元^[23],断裂以北为内蒙古隆起,主要分布着古元古代红旗营子杂岩、晚古生代的基性—超基性侵入体和闪长质—花岗质侵入体;以南则为燕山台褶带,分布着太古宙崇礼群、单塔子杂岩、怀安杂岩,古元古代孔兹岩系和中元古代—古生代未经受变质的沉积盖层^[21]。尚义—赤城断裂带中分布着变质玄武岩(斜长角闪岩)、堆晶辉长岩、堆晶辉石岩、TTG 和包括斜长橄榄岩在内的超镁铁岩、条带状硅质岩、蛇纹石大理岩。其中斜长角闪岩、堆晶岩和超镁铁岩为主体岩性,多呈无根岩块分布于断裂带内,王仁民等^[24]将断裂带的岩石组合命名为“尚义杂岩”。尚义黄土窑地区地质简图如图 1 所示。

尚义 TTG 的形成时代前人已有研究,Wang 等^[20]对 TTG 采用 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年法得出了 2512Ma±19Ma 的形成年龄,刘富等^[15]对尚义南部怀安片麻岩中的奥长花岗岩进行锆石 U-Pb 测年亦得出新太古代 2.5Ga 的成岩年龄。野外在尚义 TTG 中可见麻粒岩捕虏体。

2 样品采集和测试分析

2.1 样品采集

尚义 TTG 0616-3 和 60901-13 号样品采自厂汗营附近,60901-3-3 号样品采自黄土窑附近(与堆晶岩呈侵入接触关系)。0616-3 号样品为英云闪长岩,新鲜面为灰白色,受风化表面呈现出铁褐色,中粒全晶质结构,块状构造,组成矿物为石英(约 40%)、斜长石(50%~60%)及副矿物磁铁矿、锆石、磷灰石等;石英粒度 1~3mm,半自形粒状结构,斜长石粒度 1~3mm,半自形柱状结构。60901-13 号样品为英云闪长岩,新鲜面呈灰白色,部分风化成铁褐色,全晶质结构,块状构造,主要矿物为斜长石、石英和少量黑云母,副矿物组合为锆石、磁铁矿和磷灰石;斜长石粒径 2~3mm,半自形结构,石英颗粒粒径 1~3mm,呈半自形—它形结构。60901-3-3 号样品岩性为花岗闪长片麻岩,变晶结构,片麻状构造,主要矿物组合为斜长石(约 50%)、角闪石(约 30%)、石英(约 15%)和少量黑云母,副矿物有磁铁矿、磷灰石;角闪石呈半自形—它形结构,显示定向排列,粒径 0.2~2mm;石英粒度不均匀,它形结构,有些石英大颗粒显示出定向排列;斜长石呈半自形—它形结构,粒度 0.3mm;黑云母呈它形定向排列。H3094-1 号样品为奥长花岗岩,地球化学数据引自参考文献②,其采集地区亦为厂汗营附近(图 1)。几个样品的岩石分类见图 2。

变质玄武岩样品主要是采集于黄土窑地区的斜长角闪岩^[20],根据其稀土元素特征被划分为 TH1 型(稀土元素平坦型)和 TH2 型(稀土元素分异型)。

2.2 测试分析

分析样品为尚义 TTG(0616-3、60901-13、60901-3-3)和洋壳残片中的玄武岩(TH1 和 TH2 型),分析结果如表 1 所示。主量、微量、稀土元素分析在中国核工业部北京地质三所完成。主量元素采用 X 射线荧光光谱测试,分析精度高于 1%。微量、

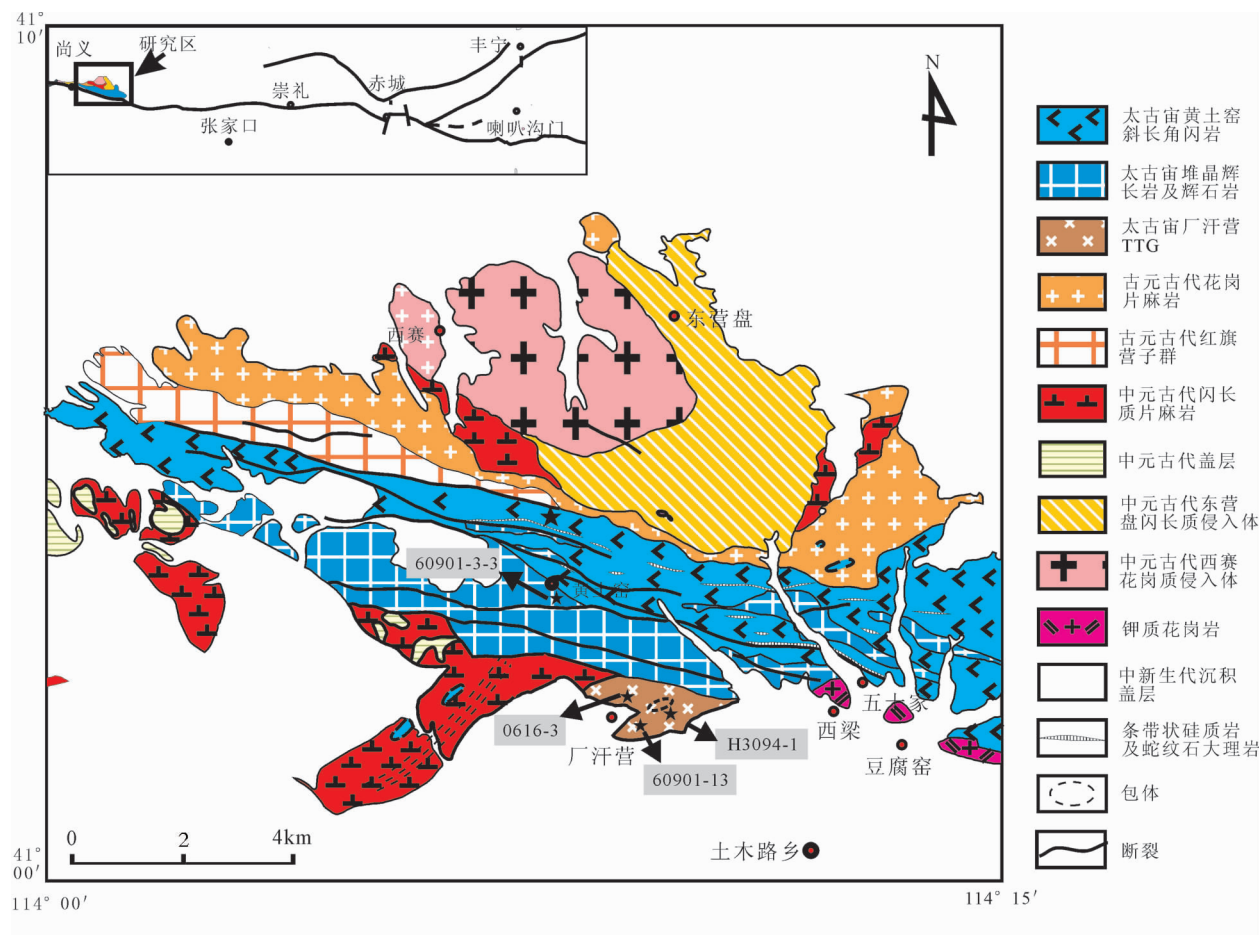


图 1 尚义黄土窑地区地质简图(据参考文献①修改)
Fig. 1 Geological sketch map of Huangtuyao area, Shangyi County

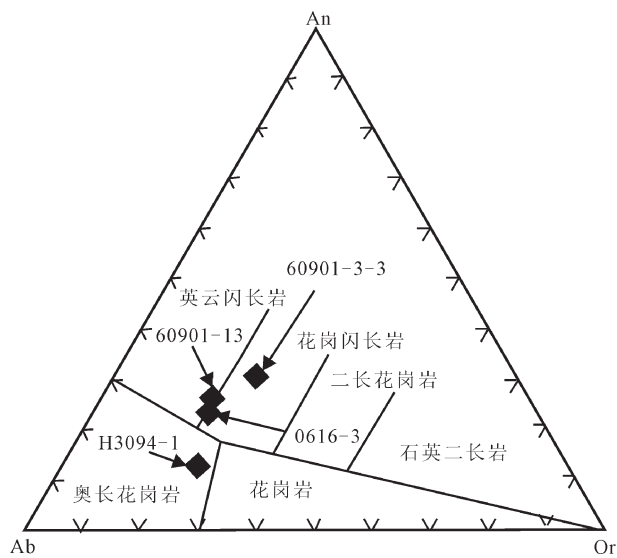


图 2 尚义 TTG An-Ab-Or 图解(底图据参考文献[25])
Fig. 2 An-Ab-Or diagram of Shangyi TTG

稀土元素采用电感耦合等离子体质谱(HR-ICP-MS),遵循 DZ/T0223-2001 进行测试,测试精度在 5%~10%以内。详细分析流程见参考文献[20]。

尚义 TTG SiO_2 含量为 65.55%~73.35%, MgO 含量变化范围为 0.11%~2.27%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.51~0.80, δ 值为 0.8~1.86, Al_2O_3 含量低,范围为 12.70%~15.12%, A/CNK 在 0.8~1.19 之间, A/NK 值在 1.39~2.19 之间,因而其属于中钾、偏铝质、钙碱性岩类。样品 60901-3-3 的 Fe 含量明显高于其它样品。TTG 的稀土元素 La 含量为 6.76×10^{-6} ~ 22.3×10^{-6} , Yb 含量从 0.16×10^{-6} 到 2.76×10^{-6} 变化,其轻重稀土元素分异程度不同(图 3-a),其 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值范围为 5.8~83.39,并显示出轻微的负 Eu 异常到明显的正 Eu 异常, δEu 值为 0.79~4.24。其中样品 60901-3-3 的稀土元素含量明显高于其它样品,低硅样品(60901-13 和 60901-3-3)的 LREE 含量高于高硅

样品(0616-3 和 H3094-1),另外所有样品的超岩浆元素 La,Ce 呈线性正相关关系(相关系数为0.977)。TTG 的大离子亲石元素 Rb、Sr、Ba 含量为一致的低值,平均值分别为 48×10^{-6} 、 466×10^{-6} 和 475×10^{-6} ,Nb、Ti 负异常(图 3-b),Cr 含量不一致,为 $6.6\times10^{-6}\sim145\times10^{-6}$ 。样品 60901-3-3 的 Y 元素含量明显高于其它样品,导致 TTG 的 Sr/Y 值变化范围为 11.56~379.07。

尚义玄武岩根据稀土元素分配特征可被分为 TH1 型(稀土元素平坦型)和 TH2 型(稀土元素分异型)(表 1)。TH1 型轻重稀土元素基本无分异, $(La/Yb)_N$ 值平均为 2.43;TH2 型轻重稀土元素分异较明显, $(La/Yb)_N$ 值平均为 14.46。主量元素方面,TH1 型玄武岩的 Al_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 含量和 K_2O+Na_2O 值、 K_2O/Na_2O 比值、 δ 值均低于 TH2 型, TFe_2O_3 、 MnO 、 CaO 含量高于 TH2 型,TH1 型玄武

表 1 尚义玄武岩和 TTG 的主量、微量和稀土元素含量

Table 1 Major elements,trace elements and REE compositions of Shangyi basalt and TTG

样品号	0616-3	60901-13	60901-3-3	H3094-1	平均值	60901-4-1	TH1	TH2
岩性	英云闪长岩	英云闪长岩	花岗闪长岩	奥长花岗岩	TTG	变质玄武岩	变质玄武岩	变质玄武岩
SiO ₂	73.35	65.55	68.38	73.00	70.07	46.45	48.08	48.21
TiO ₂	0.03	0.24	0.65	0.20	0.28	1.63	1.30	1.04
Al ₂ O ₃	12.70	12.88	13.77	15.12	13.62	10.88	12.68	16.02
TFe ₂ O ₃	1.53	1.44	5.35	1.32	2.41	11.93	14.10	10.13
MnO	0.03	0.00	0.20	0.01	0.06	0.24	0.28	0.17
MgO	0.11	2.20	2.27	0.21	1.20	5.96	6.39	6.95
CaO	3.83	4.59	2.92	1.69	3.26	19.38	11.50	8.22
Na ₂ O	3.63	3.47	2.50	4.88	3.62	0.80	1.94	2.72
K ₂ O	1.84	1.80	2.01	2.59	2.06	0.60	0.64	2.31
P ₂ O ₅	0.02	0.09	0.12	0.13	0.09	0.18	0.17	0.53
LOI	2.69	7.38	1.42	0.77	3.07	1.40	2.52	3.23
TOTAL	99.76	99.64	99.59	99.92	99.74	99.45	99.59	99.51
FeO	0.65	0.62	3.79	0.50	1.39	8.86	8.12	5.33
A/CNK	0.85	0.80	1.19	1.09	0.96	0.29	0.51	0.73
A/NK	1.59	1.68	2.19	1.39	1.66	5.53	3.27	2.30
K ₂ O/Na ₂ O	0.51	0.52	0.80	0.53	0.57	0.75	0.33	0.85
K ₂ O+Na ₂ O	5.47	5.27	4.51	7.47	5.68	1.40	2.58	5.03
δ	0.99	1.23	0.80	1.86	1.19	0.57	1.31	4.85
Cr	145	6.6	74.6	26	63	73	155	74.2
Ni	11	168	38	n.d	72	51	79	57
Co	3.2	3.4	11.7	n.d	6.1	39.1	44.0	30.7
V	15	33	97	n.d	49	313	285	178
Rb	26	37	79	50	48	28	18	76
Ba	472	580	444	405	475	75	387	1211
Sr	339	452	259	815	466	320	383	1080
Nb	0.12	1.76	11.40	15.40	7.17	3.64	5.95	10.77
Ta	1.06	0.04	0.66	?	0.59	0.20	0.37	0.50
Th	0.03	2.83	7.23	?	3.36	0.24	1.74	2.76
U	0.29	0.89	1.32	?	0.83	0.19	0.99	0.71
Zr	20	136	167	167	123	50	77	64
Y	1.93	2.24	22.4	2.15	7.18	37.80	26.51	21.9
Sr/Y	175.65	201.79	11.56	379.07	64.94	8.47	14.44	49.30

(续表 1)

样品号	0616-3	60901-13	60901-3-3	H3094-1	平均值	60901-4-1	TH1	TH2
岩性	英云闪长岩	英云闪长岩	花岗闪长岩	奥长花岗岩	TTG	变质玄武岩	变质玄武岩	变质玄武岩
Rb/Sr	0.08	0.08	0.31	0.06	0.10	0.09	0.05	0.07
K/Rb	583	400	211	430	355	180	292	250
La	6.76	18.60	22.30	10.20	14.47	4.51	9.34	40.55
Ce	9.55	28.40	42.70	17.60	24.56	12.10	21.41	84.11
Pr	0.85	2.89	5.11	2.60	2.86	2.18	3.24	11.00
Nd	2.62	9.81	19.40	6.40	9.56	11.60	14.76	44.34
Sm	0.34	1.22	3.80	1.44	1.70	3.81	3.89	8.05
Eu	0.47	0.72	0.99	0.64	0.71	1.29	1.32	2.37
Gd	0.34	0.94	3.83	0.92	1.51	5.49	4.70	7.08
Tb	0.05	0.10	0.60	0.12	0.22	1.01	0.80	0.90
Dy	0.29	0.44	3.79	0.54	1.26	6.33	4.81	4.60
Ho	0.06	0.07	0.83	0.11	0.27	1.39	1.01	0.87
Er	0.16	0.22	2.63	0.21	0.80	4.14	2.96	2.42
Tm	0.03	0.02	0.41	0.09	0.14	0.61	0.43	0.31
Yb	0.21	0.16	2.76	0.20	0.83	3.89	2.76	2.01
Lu	0.04	0.02	0.44	0.10	0.15	0.60	0.42	0.29
(La/Yb) _N	23.09	83.39	5.80	36.58	12.46	0.83	2.43	14.46
Yb _N	1.24	0.94	16.24	1.18	4.90	22.88	16.21	11.83
δEu	4.24	1.98	0.79	1.59	1.32	0.86	0.94	0.94

注:样品 H3094-1 引自参考文献②,TH1 和 TH2 为参考文献[20]中玄武岩数据的加权平均值,样品 60901-4-1 为 TH1 代表性样品;氧化物含量的单位为%,微量和稀土元素为 10⁻⁶

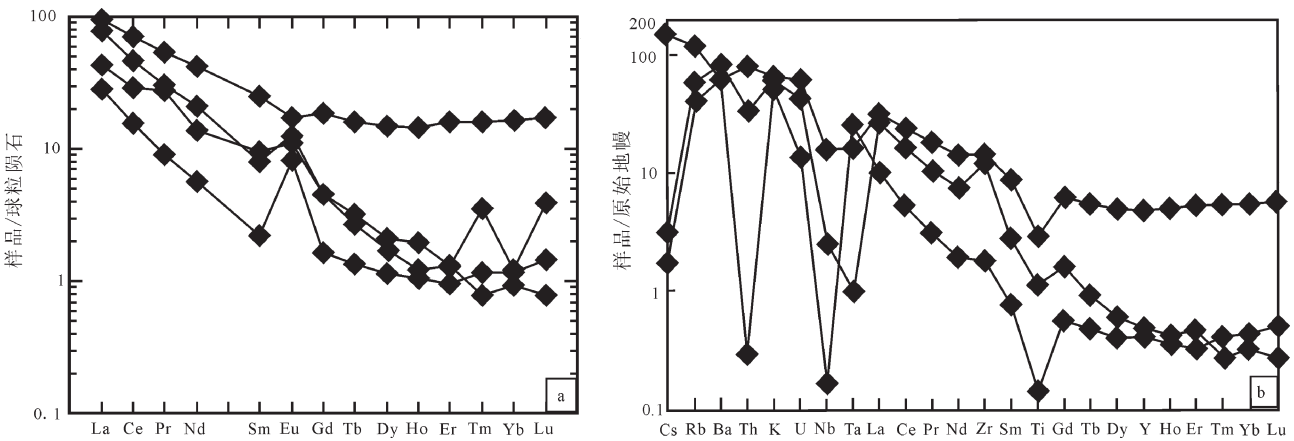


图 3 尚义 TTG 稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

(a 图底图据参考文献[27],下同)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spidergrams (b) of Shangyi TTG

岩属于拉斑玄武岩系列,而 TH2 型较之 TH1 偏碱性。微量元素方面,TH1 型玄武岩 Rb、Sr、Ba、Nb、LREE 元素含量低于 TH2 型,Cr、Ni、Co、V 和 HREE 含量高于 TH2 型。

3 讨论

3.1 尚义玄武岩性质分析

尚义 TH1 型玄武岩轻重稀土元素基本无分异,

其稀土元素分配型式与 E-MORB 相似(图 4-a),但 Rb、Sr、Ba、K 和稀土元素含量略高于 E-MORB^[24],表明 TH1 型玄武岩源区的富集程度高于 E-MORB。TH2 型玄武岩轻重稀土元素分异较明显, $(La/Yb)_N$ 平均为 14.46,微量元素含量与 OIB(洋岛玄武岩)^[26]相近,尤其稀土元素含量最为接近(图 4-a),表明 TH2 型玄武岩亦来源于富集地幔。TH2 型玄武岩与 TH1 型共生,同时其 Rb、Sr、Ba、K 和稀土元素含量高于 TH1 型,笔者推测 TH2 型玄武岩不仅源于富集地幔,其形成后还受到了地壳的同化作用,从 TH2 型玄武岩到接触围岩的 Nb 元素含量渐低^[20],证明同化作用存在。

3.2 尚义 TTG 成因分析

Barker 等^[27]和 Drummond 等^[28]以 SiO_2 含量 70%、 Al_2O_3 含量 15%为限将 TTG 划分为高铝型和低铝型,判别图解见图 4-b。高铝型 TTG 特征为:①Sr 含量高($>300 \times 10^{-6}$,甚至 $>2000 \times 10^{-6}$),Rb/Sr 比值非常低(<0.15);②富集 LREE,亏损 HREE,无 Eu 异常或轻微正异常;③Y 含量低($<15 \times 10^{-6}$);④K/Rb 比值低到中等,大部分低于 550;⑤Nb 元素含量低($<10 \times 10^{-6} \sim 11 \times 10^{-6}$)。低铝型 TTG 特征为: Sr 元素含量低($<200 \times 10^{-6}$),轻微富集 LREE, HREE 分配平缓, $(La/Yb)_N$ 一般低于 20^[3],负 Eu 异常。太古宙的 TTG 主要是高铝型^[29],少数为低铝型,至今研究认为是低铝型 TTG 的岩石有斯威士兰的古老片麻岩^[30]、特顿山脉韦布峡谷片麻岩中的变质流纹

岩^[31]、津巴布韦克拉通新太古代 Tati 花岗-绿岩带地体中的低铝型 TTG 岩体^[32]、西澳皮尔巴拉克拉通的古太古代低铝型 TTG^[33]、加拿大苏必利尔西部 Sturgeon 岩系中的长英质组分中低铝亚相^[34]和苏必利尔新太古代 Abitibi 南部火山带中的 Lac Flavrian、Bourlamaque TTG 岩体^[35]。学者们通常将低铝型 TTG 归因于玄武质岩浆源区残留斜长石+角闪石的分异作用。根据 Al_2O_3 含量判别尚义 TTG 样品 0616-3、60901-13 和 60901-3-3 为低铝型 TTG, H3094-1 为高铝型 TTG,然而从微量元素 Rb、Sr、Y 和 REE 角度分析,只有样品 60901-3-3 表现出了低铝型 TTG 的特征, 0616-3、60901-13 和 H3094-1 却表现出高铝型 TTG 的性质。在 $(La/Yb)_N$ - Yb_N 和 Sr/Y-Y 图解^[37](图 5)中,尚义 TTG 样品数据点大部分落于俯冲板片熔融的埃达克岩区域,少数落于岛弧岩浆区域,并显示出渐变过渡的特征,同时尚义 TTG 以其低铝特征与埃达克岩相区别,暗示其与埃达克岩成因相似但形成压力较低,因此推测尚义 TTG 形成于洋壳玄武岩的部分熔融。

有学者^[38-39]指出,大洋斜长花岗岩亦是低铝型 TTG 的一种,尚义 TTG 虽然岩相上与斜长花岗岩相似,但却不具有大洋斜长花岗岩的 K、Rb、Sr 含量极低、亏损 LREE、富集 HREE 的特征,表现为大陆边缘和岛弧的钙碱性花岗岩(图 6),在花岗岩构造环境判别图解^[40](图 7)中尚义 TTG 样品数据点落入 VAG(火山弧型花岗岩)范围内。

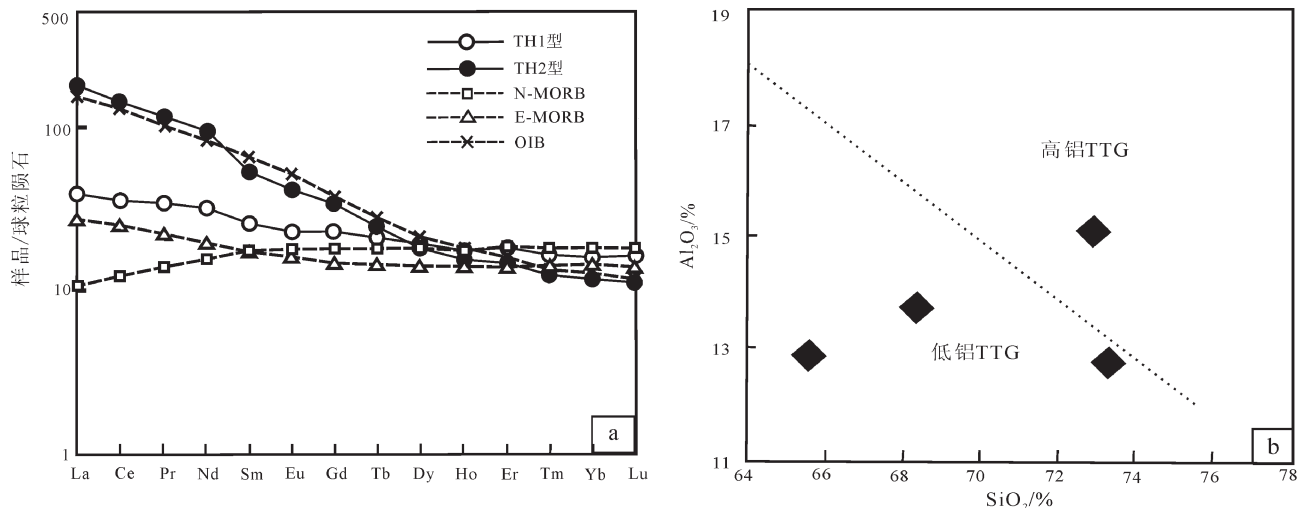


图 4 尚义玄武岩平均稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和 TTG 的 Al_2O_3 - SiO_2 图解(b)

(b 图底图据参考文献[36])

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a) of Shangyi average basalt and Al_2O_3 - SiO_2 diagram (b) of Shangyi TTG

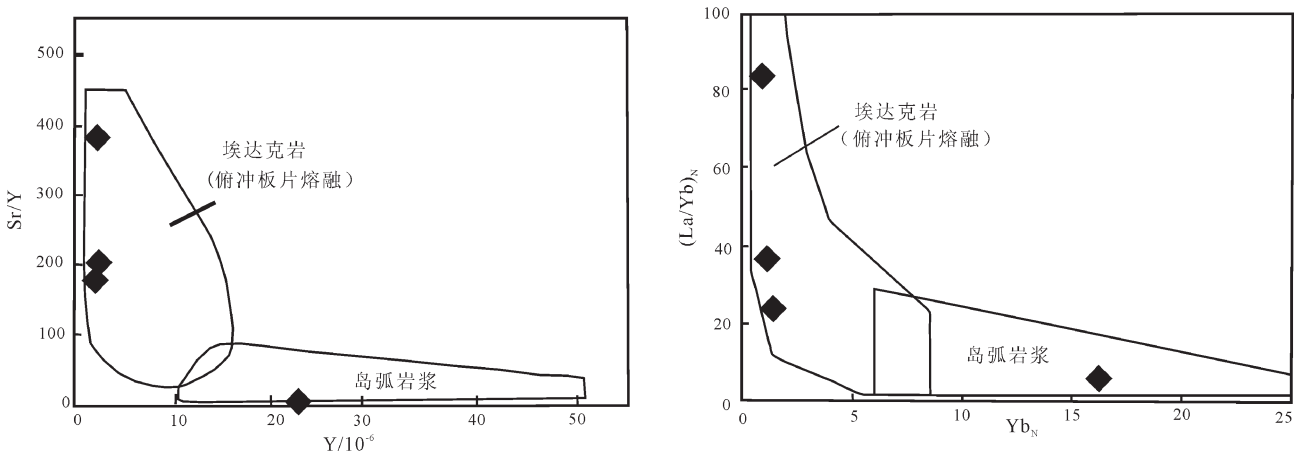


图 5 尚义 TTG Y-Sr/Y 和 $Yb_N-(La/Yb)_N$ 图解 (底图参考文献[37])
Fig. 5 Y-Sr/Y and $Yb_N-(La/Yb)_N$ diagrams of Shangyi TTG

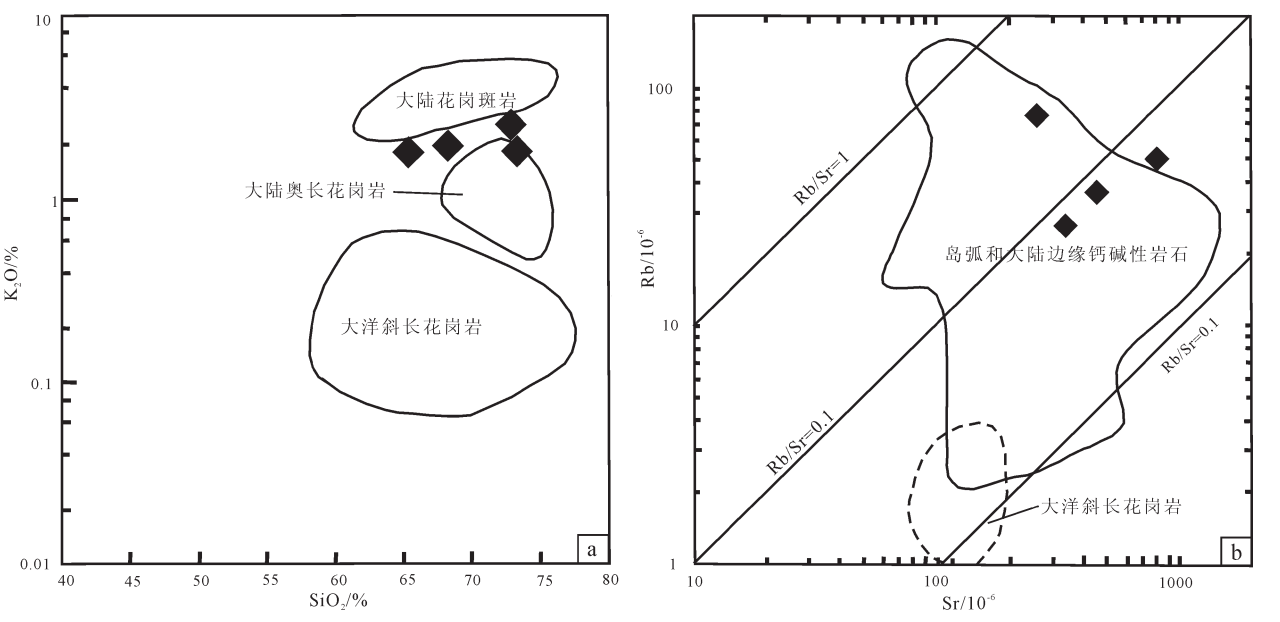


图 6 尚义 TTG K_2O-SiO_2 和 Rb-Sr 图解 (底图参考文献[38])
Fig. 6 K_2O-SiO_2 and Rb-Sr diagrams of Shangyi TTG

张旗等^[41-42]根据残留相组成和 Sr、Yb($Sr=400\times 10^{-6}$ 和 $Yb=2\times 10^{-6}$)含量将花岗岩形成压力分为 3 或 4 个级别:①高压下与石榴子石平衡的花岗岩;②中压或较高压力,麻粒岩相(由斜长石+石榴子石+角闪石+辉石组成);③低压下,残留相有斜长石无石榴子石(角闪岩相);④与蛇绿岩有关的 M 型花岗岩,非常低压(高温)条件。Moyen^[3]通过统计分析大量公开发表的 TTG 数据(>3000 个),将 TTG 分为高压(20%)、中压(60%)和低压(20%)3 种类型:高压类型以 Al_2O_3 、 Na_2O 、Sr 含量高和 Y、Yb、Ta、Nb 含

量低为特征;低压类型则具有富集 HREE 和低 Sr、Sr/Y、La/Yb 的特征,与 Barker^[26]定义的低铝型 TTG 基本一致;中压类型介于两者之间,并认为不同压力类型的 TTG 是由轻微富集的拉斑玄武岩在不同深度下熔融,源区残留不同矿物相造成的,1000~1200MPa 下(斜长石+辉石±角闪石)形成低压类型,1500MPa 下(角闪石+石榴子石)形成中压类型,2000MPa 或更高(石榴子石+金红石)形成高压类型。按照主量元素 SiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 、 Al_2O_3 和微量元素 Rb、Sr、Nb、Y、REE 的指标,初步判断尚义 TTG

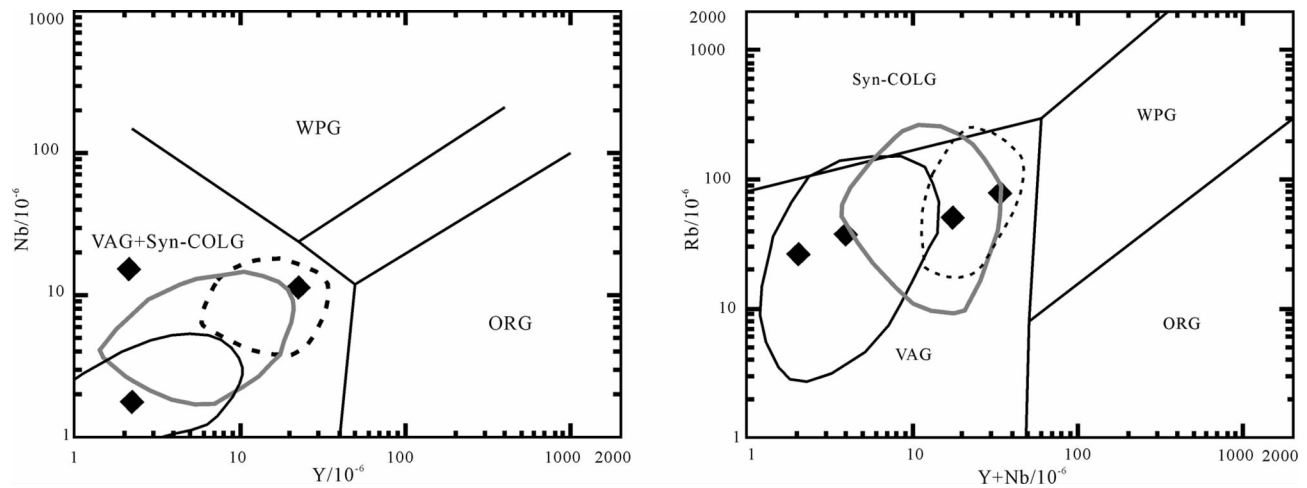


图 7 尚义 TTG Nb-Y 和 Rb-(Y+Nb)构造环境判别图解(底图据参考文献[3]和[40])

Fig. 7 Nb-Y and Rb-(Y+Nb) diagrams for tectonic discrimination of Shangyi TTG

WPG—板块内部型;Syn-COLG—同碰撞型;VAG—火山弧型;ORG—洋中脊型;黑色线区域为高压型,灰色线区域为中压型,虚线区域为低压型

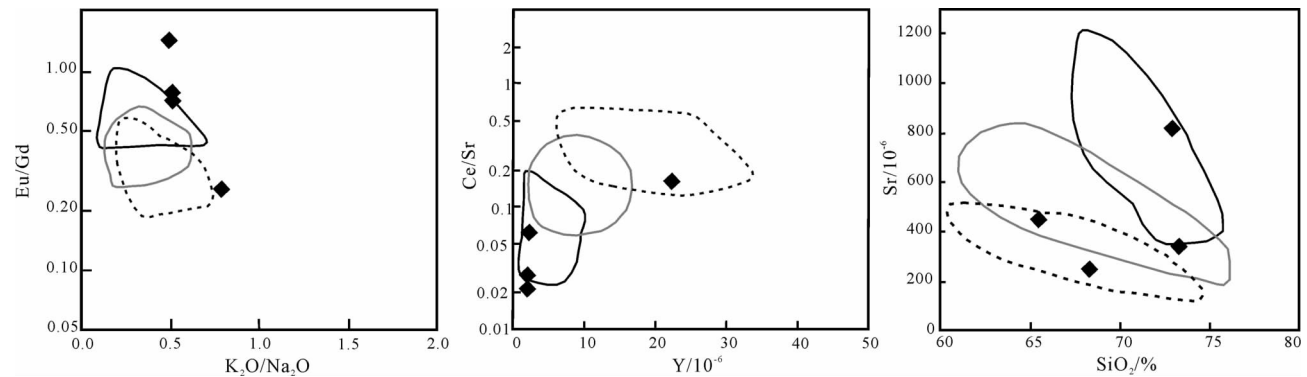


图 8 尚义 TTG 形成压力判别图解(底图据参考文献[3])

Fig. 8 Discrimination diagrams for the formation pressure of Shangyi TTG

黑色线区域为高压型,灰色线区域为中压型,虚线区域为低压型

表 2 TH1 玄武岩平衡熔融模式计算微量元素结果

Table 2 Trace elements calculated from equilibrium melting model 10⁻⁶

样品号	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Er	Yb	Lu
60901-4-1	4.51	12.10	11.60	3.81	1.29	5.49	1.01	6.33	4.14	3.89	0.60
60901-3-3	22.3	42.7	19.4	3.8	0.99	3.83	0.60	3.79	2.63	2.76	0.44
计算结果	22.28	43.44	17.6	4.21	1.24	3.86	0.64	4	2.76	2.88	0.44

注:F=5%;残留矿物组合为 Hbl(80%)+Opx(20%)

形成压力遍及低、中、高压范围,喻示其形成深度存在变化(图 7、图 8)。低 Si 样品(60901-13、60901-3-3)中的 LREE 含量高于高 Si 样品(0616-3、H3094-1),可排除高 Si 的岩石是早期低 Si TTG 部分熔融产物的可能。TTG 样品中 La、Ce 元素线性相关,

表明为相同熔融程度的结果。因此,TTG 的成分变化归因于形成时熔融压力的变化,导致源区残留不同的矿物相。

Moyen^[3]指出,太古宙 TTG 的源区不是正常的 MORB 玄武岩,而是轻微富集的类型。尚义洋壳玄

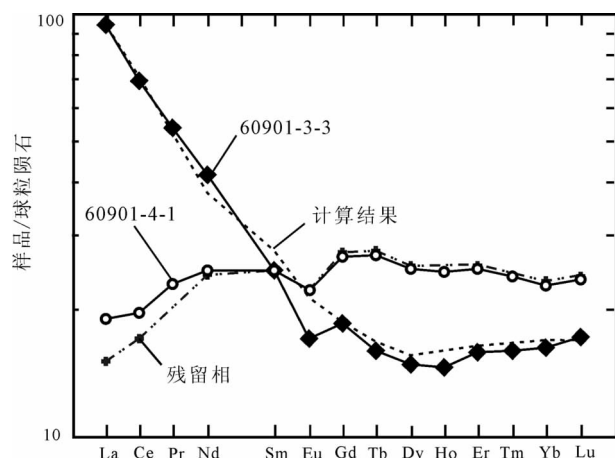


图9 尚义 TH1 玄武岩平衡熔融计算结果
与低铝 TTG 对比图解

Fig. 9 Result of equilibrium melting calculation
of Shangyi TH1 basalt in comparison with TTG

玄武岩显示出富集特征,很可能代表了 TTG 的原岩。其中,TH2 型玄武岩遭受了围岩同化,使其稀土元素含量均高于 TTG(表 1),不可能为 TTG 形成的熔融原岩。笔者认为 TH1 型玄武岩部分熔融形成了尚义 TTG。

考虑到低铝 TTG 的特殊性,本文选择明显为低铝型 TTG 的样品 60901-3-3 进行平衡部分熔融模拟计算,母岩选用稀土元素分异程度最低、最具大洋拉斑玄武岩性质的 TH1 型玄武岩样品 60901-4-1,矿物的分配系数采用 Teixeira^[43]中的附加数据,得出样品 60901-4-1 残留相为角闪石(80%)+斜方辉石(20%)、熔体比例为 5%时,产物的稀土元素含量与 60901-3-3 匹配(表 2、图 9),表明尚义地区太古宙特殊的低铝型 TTG 为洋壳拉斑玄武岩在低压条件下小比例部分熔融形成的。

综上所述,尚义 TTG 是洋壳玄武岩(TH1 型)在深度压力变化的条件下部分熔融形成的,形成压力遍及低压—高压范围,低压条件下形成低铝型 TTG。这种深度变化反映了一种洋壳俯冲的过程。

3.3 尚义玄武岩和 TTG 地质演化

尚义—赤城断裂带中分布有超镁铁质岩、堆晶辉长—辉石岩、玄武岩、条带状硅质岩和蛇纹石大理岩,可能为古蛇绿岩套的组成部分,其中玄武岩指示其来源于富集地幔。笔者认为尚义—赤城带新太古代时期为洋内岛弧俯冲环境,洋壳沿尚义—赤城带

俯冲,俯冲板片熔体交代岛弧下的地幔楔形成富集地幔,随后弧后拉伸环境下富集地幔部分熔融产生堆晶岩、玄武岩(TH1 型)等 SSZ 型蛇绿岩组分,玄武岩在深度不断变化的过程中部分熔融形成 TTG 岩浆。TH2 型玄武岩的形成与地壳同化作用有关。

4 结 论

尚义玄武岩具富集型玄武岩的特征,指示其源于富集地幔。尚义 TTG 地球化学成分表现出低铝型 TTG 和埃达克岩的性质,指示其形成与洋壳玄武岩部分熔融有关。根据主量元素 SiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 、 Al_2O_3 和微量元素 Rb、Sr、Y、REE 等指标判别及微量元素平衡熔融模式计算结果,笔者认为尚义 TTG 形成压力遍及低压—高压范围,是洋壳玄武岩在深度压力变化的条件下部分熔融形成的,反映了洋壳俯冲机制,低压下形成低铝型 TTG。

致谢: 北京大学陈衍景教授对本次研究提出指导性建议,审稿专家对本文提出宝贵的修改意见,在此一并致谢。

参考文献

- [1]Zhai M G, Guo J H, Liu W J. Neoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China Craton: a review[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2005, 24: 547–561.
- [2]翟明国. 华北克拉通的形成演化与成矿作用[J]. 矿床地质, 2010, 29(1): 24–36.
- [3]Moyen J F. The composite Archaean grey gneisses: Petrological significance, and evidence for a non-unique tectonic setting for Archaean crustal growth[J]. Lithos, 2011, 123: 21–36.
- [4]李江海, 钱祥麟, 黄雄南, 等. 华北陆块基底构造格局及早期大陆克拉通化过程[J]. 岩石学报, 2000, 16(1): 1–10.
- [5]翟明国, 卞爱国. 华北克拉通新太古代末超大陆拼合及古元古代末—中元古代裂解[J]. 中国科学(D 辑), 2000, B12: 129–137.
- [6]翟明国, 郭敬辉, 赵太平. 新太古—古元古代华北陆块构造演化的研究进展[J]. 前寒武研究进展, 2001, 24(1): 17–27.
- [7]彭澎, 翟明国. 华北陆块前寒武纪两次重大地质事件的特征和性质[J]. 地球科学进展, 2002, 17(6): 818–825.
- [8]Zhai M G, Liu W J. Palaeoproterozoic tectonic history of the North China craton: a review[J]. Precambrian Research, 2003, 122: 183–199.
- [9]赵国春, 孙敏, Wilde S A. 华北克拉通基底构造单元特征及早元古代拼合[J]. 中国科学(D 辑), 2002, 32(7): 538–549.
- [10]Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. Metamorphism of basement rocks in the Central Zone of the North China Craton: implications for Paleoproterozoic tectonic evolution[J]. Precambrian Research, 2000, 103: 55–88.
- [11]Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, et al. Archean blocks and

- their boundaries in the North China craton: Lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution[J]. *Precambrian Research*, 2001, 107: 45-73.
- [12] Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited[J]. *Precambrian Research*, 2005, 136: 177-202.
- [13] 耿元生, 刘敦一, 宋彪. 冀西北麻粒岩区早前寒武纪主要地质事件的年代格架[J]. *地质学报*, 1997, 71(4): 316-327.
- [14] 沈其韩, 耿元生, 宋彪, 等. 华北和扬子陆块及秦岭-大别造山带地表和深部太古宙基底的新信息[J]. *地质学报*, 2005, 79(5): 616-627.
- [15] 刘富, 郭敬辉, 路孝平, 等. 华北克拉通 2.5Ga 地壳生长事件的 Nd-Hf 同位素证据: 以怀安片麻岩为例[J]. *科学通报*, 2009, 54: 2517-2526.
- [16] 沈其韩, 钱祥麟. 中国太古宙地质体组成、阶段划分和演化[J]. *地球学报*, 1995, 2: 113-120.
- [17] 李江海, 牛向龙, Kusky T M, 等. 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[J]. *地学前缘*, 2004, 11(3): 273-283.
- [18] 翟明国, 彭澎. 华北克拉通元古代构造事件[J]. *岩石学报*, 2007, 23(11): 2665-2682.
- [19] 贺元凯, 吴泰然, 罗红玲, 等. 华北板块北缘中段新太古代的陆-陆碰撞事件: 来自合教 S 型花岗岩的证据[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(4): 571-580.
- [20] Wang R M, Wan Y S, Cheng S H, et al. Modern-Style Subduction Processes in the Archean: Evidence from the Shangyi Complex in North China Craton[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83: 535-543.
- [21] Liu S W, Tian W, Lv Y J, et al. Geochemistry, Nd isotopic characteristics of metamorphic complexes in Northern Hebei: implication for crustal accretion[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(6): 807-818.
- [22] 凤永刚. 冀北尚义杂岩地球化学和锆石 U-Pb 同位素年代学研究[D]. 北京大学硕士学位论文, 2008: 7-11, 66.
- [23] 陈强安, 王方正. 崇礼-赤城断裂带超镁铁岩岩石学特征及其地质意义[J]. *矿物岩石学论丛*, 1992, 8: 94-102.
- [24] 王仁民, 凤永刚, 程素华. 富 Nb 玄武岩在冀北前寒武纪地区的发现[J]. *高校地质学报*, 2007, 13: 458-462.
- [25] Doebrich J L, Al-Jehani A M, Siddiqui A A, et al. Geology and metallogeny of the Ar Rayn terrane, eastern Arabian shield: Evolution of a Neoproterozoic continental-margin arc during assembly of Gondwana within the East African orogen[J]. *Precambrian Research*, 2007, 158: 17-50.
- [26] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publication*, 1989, 42: 313-345.
- [27] Barker F, Arth J G. Generation of trondhjemitic-tonalitic liquids and Archean bimodal trondhjemitic-basalt suites[J]. *Geology*, 1976, 10(4): 596-600.
- [28] Drummond M S, Defant M J. A model for trondhjemitic-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons[J]. *Journal of Geophysical*, 1990, 95: 21503-21521.
- [29] Martin H, Smithies R H. An overview of adakite, tonalite-trondhjemitic-granodiorite (TTG) and sanukitoid: relationships and some implication for crustal evolution[J]. *Lithos*, 2005, 79: 1-24.
- [30] Hunter D R, Barker F, Peterman Z E, et al. Geochemistry of the Ancient Gneiss Complex of Swaziland: A preliminary report[C]. U.S. Geol. Survey Open-File Rept., 1975: 75-169, 16.
- [31] Reed J C, Zartman R E. Geochronology of Precambrian rocks of the Teton Range, Wyoming[J]. *Geol. Soc. America Bull.*, 1973, 84: 561-582.
- [32] Kampunzu A B, Tombale A R, Zhai M, et al. Major and trace element geochemistry of plutonic rocks from Francistown, NE Botswana: evidence for a Neoarchean continental active margin in the Zimbabwe craton[J]. *Lithos*, 2003, 71: 431-460.
- [33] Smithies R H, Champion D C, Van Kranendonk M J. Formation of Paleoproterozoic continental crust through infracrustal melting of enriched basalt[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 281: 298-306.
- [34] Whalen J B, McNicoll V J, Galley A G, et al. Tectonic and metallogenic importance of an Archean composite high- and low-Al tonalite suite, Western Superior Province, Canada[J]. *Precambrian Research*, 2004, 132: 275-301.
- [35] Feng R, Kerrich R. Geochemical evolution of granitoids from the Archean Abitibi Southern Volcanic Zone and the Pontiac subprovince, Superior Province, Canada: Implications for tectonic history and source regions[J]. *Chemical Geology*, 1992, 98: 23-70.
- [36] Halla J, Hunen J V, Heilimo E, et al. Geochemical and numerical constraints on Neoarchean plate tectonics[J]. *Precambrian Research*, 2009, 174: 155-162.
- [37] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 1990, 347: 662-665.
- [38] Coleman R G, Peterman Z E. Oceanic Plagiogranite[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, 80: 1099-1108.
- [39] Rollinson H. New models for the genesis of plagiogranites in the Oman ophiolite[J]. *Lithos*, 2009, 112: 603-614.
- [40] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25: 956-983.
- [41] 张旗, 王焰, 李承东, 等. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(9): 2249-2269.
- [42] 张旗, 王焰, 李承东, 等. 花岗岩按照压力的分类[J]. *地质通报*, 2006, 25(11): 1274-1278.
- [43] Teixeira L R. O complexo caraíba e a suíte são José do Jacuípe no cinturão salvador-curaçá (Bahia Brasil): petrologia, geoquímica e potencial metalogênico[D]. Bahia: Universidade federal da Bahia instituto de geociências, 1997: 202-204 anexo.
- ① 中国地质大学(北京). 1:5 万土木路幅区域地质图. 1994.
- ② 中国地质大学地质调查所. 1:5 万尚义幅区域地质调查报告. 1994.