

河南嵩山地区新太古代斜长角闪岩的地球化学特征与成因*

周艳艳^{1,3} 赵太平^{1**} 薛良伟² 王世炎⁴

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

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

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

2009-04-03 收稿, 2009-10-12 改回.

Zhou YY, Zhao TP, Xue LW and Wang SY. 2009. Geochemistry and origin of Neoproterozoic amphibolites in Songshan, Hennan province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11):3043–3056

Abstract The Dengfeng Group in Songshan area is a part of the ancient crystalline basement in the southern part of the North China Craton. The Group mainly consists of metamorphosed volcanogenic and sedimentogenic supracrustal rocks, in which the amphibolite is a very common type. The amphibolite includes two types which occur as rock body in Dengfeng Group and as enclaves in TTG gneiss, respectively. Both types have similar major components, they are all rich in Fe_2O_3 , Al_2O_3 and CaO but poor in TiO_2 (ranging from 0.50% to 1.11%), and have SiO_2 content ranging from 45% to 63%. These features indicate that they are orthometamorphite and are similar to sub-alkaline basalts and andesite. Nevertheless, the trace and rare earth element characteristics of amphibolites body in Dengfeng Group and amphibolites enclaves in TTG gneiss are different, the former has relatively flat REE pattern ($(\text{La}/\text{Yb})_N$ is from 0.99 to 2.07) with no Eu anomalies (δEu is about 1) on the chondrite-normalized REE patterns, and exhibit negative Ti but positive Ba and Sr anomalies with slightly negative Nb, Ta and Y anomalies on the primitive-mantle normalized spidergrams, similar to MORB and island arc tholeiite. The whole rock Nd isotopic compositions ($\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ is 4.43) of the amphibolite body indicate that they may originate from a depleted mantle. In contrast, the enclaves in TTG gneiss have relatively higher HREE/HREE ratios with negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.46$ to 0.87). It has higher Rb, Cs and Ba contents but lower Ti content than the amphibolites body, and exhibits negative Nb, Ta and Y anomalies, similar to island arc basalts. The whole rock Nd isotopic compositions ($\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ are 2.56 and 4.08) indicate that the enclaves may originate from a depleted mantle with the assimilation of older crust. We propose that the amphibolite body in Dengfeng Group may have formed by partial melting of mantle wedge in a subduction zone and erupted through the back-arc basin, whereas the enclaves in TTG gneiss may have formed by partial melting of mantle wedge with assimilation of melts formed by slight partial melting of subducted oceanic slab. The geochemical characteristics of the both types of amphibolites indicate that the geodynamic background of Dengfeng Group is oceanic slab subducting in a convergent plate margin, reflecting that the continent crust in the Neo-Archean could grow in a parallel way.

Key words Dengfeng Group; Amphibolite; Geochemistry; North China Craton

摘要 嵩山地区登封群是华北克拉通南部古老结晶基底的重要组成部分,由一套火山-沉积成因的表壳岩系组成,形成于新太古代。斜长角闪岩广泛发育于登封群表壳岩中,同时,也以包体形式普遍存在于TTG片麻岩体内部。二者主量元素

* 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)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,博士生导师,岩石学专业, E-mail: tpzhao@gig.ac.cn

差别不大, SiO_2 含量为 45% ~ 63%, 富 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 CaO 、 TiO_2 (0.5% ~ 1.11%) 含量较低, 原岩为亚碱性玄武岩、安山岩。二者的微量元素特征稍有差别, 登封群斜长角闪岩 REE 配分形式平坦, 轻重稀土基本无分异 ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 0.99 \sim 2.07$), 基本无 Eu 异常 ($\delta\text{Eu} \approx 1$); Ti 负异常, Nb、Ta、Y 负异常不明显, Ba、Sr 呈现正异常, 显示洋中脊和岛弧拉斑玄武岩特征; 在 Cr-Y、Ta/Yb-Th/Yb、Zr/Y-Nb/Y 图解中位于洋中脊向岛弧玄武岩的过渡区域; $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = 4.43$, 显示源岩来自亏损地幔。而 TTG 片麻岩中斜长角闪岩包体的 LREE 富集, Eu 负异常明显 ($\delta\text{Eu} = 0.46 \sim 0.87$); 大离子亲石元素 Rb、Cs、Ba 明显高于登封群中的斜长角闪岩, 除了 Ti 含量稍低外, Zr、Nb 和 Y 含量范围和登封群斜长角闪岩相似, Nb、Ta 和 Y 呈负异常, 具有岛弧玄武岩特征; $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = 2.56$ 和 4.08, 显示源岩来自亏损地幔, 反映有地壳物质的混染。登封群斜长角闪岩及斜长角闪岩包体原岩的源区物质有所不同, 在汇聚板块边缘洋壳俯冲条件下, 前者是地幔楔部分熔融的产物, 形成于弧后盆地环境; 后者可能是随着俯冲作用的进行, 小部分板片熔融开始发生, 形成的熔浆混染亏损地幔部分熔融形成的熔浆。地球化学特征显示登封群形成的地球动力学背景是汇聚板块边缘洋壳的俯冲, 反映当时陆壳以水平方式增生。

关键词 登封群; 斜长角闪岩; 地球化学; 华北克拉通

中图法分类号 P588.124

1 引言

绿岩带是太古宙地壳的主要物质组成, 反映早前寒武纪大陆地壳形成和发展所特有的火山作用、沉积物堆积 (如: Windley, 1977)。绿岩带中的变质基性火山岩多是从地幔直接衍生出来 (耿元生等, 2002), 其成因及构造环境可以为早期地壳增生及演化机制提供重要信息 (如: Kampunzu *et al.*, 2003), 但其形成的地球动力学背景倍受争议 (如: Ayres and Thurston, 1985; Goodwin, 1991), 可能涉及与岛弧有关的俯冲增生过程 (Taira, 1992; De Wit and Ransome, 1992)。

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。登封花岗岩-绿岩地体是华北克拉通南部古老结晶基底的主要组成部分, 其中登封群表壳岩是嵩山地区最古老的地层, 斜长角闪岩广泛出露于登封群表壳岩系中, 以角闪岩相-绿片岩相区域变质作用为主。同时, 除在 TTG 片麻岩与表壳岩的侵入接触带上有与邻近表壳岩岩性一致的包体外, 在 TTG 片麻岩体内部存在较多斜长角闪岩包体, 它们存在于岩体中央部位, 与表壳岩无直接的关系。胡受奚和林潜龙 (1988)、陈衍景和富士谷 (1992) 将登封群三分, 认为登封群内存在不整合, 不整合面以下为太古宙 TTG 杂岩, 其中的斜长角闪岩包体为第一次绿岩的残留体。薛良伟等 (2005) 则认为 TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体反映登封群斜长角闪岩深层次地球化学特征, 是登封群斜长角闪岩的一部分, 与其同时同源。

大量基性火山岩的喷发对早期陆壳形成和增生及壳幔分异起到重要作用 (耿元生等, 2002)。因此, 本文利用登封群斜长角闪岩及 TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体的地球化学及 Nd 同位素特征, 进行斜长角闪岩原岩恢复、分析并对比二者成因上的区别和联系。同时, 结合嵩山地区登封群火山-沉积岩石组合特征来探讨登封群形成的地球动力学背景, 进而为新太古代华北克拉通南缘早期陆壳演化机制的研究提供地球化学方面的制约条件。

2 区域地质概况

登封群主要分布在嵩山地区君召以北, 地层大致呈东西向分布于嵩山背斜核部, 各组成地层的展布呈近南北向延伸 (图 1), 是一套火山-沉积成因的表壳岩系。由下而上分为三个组 (劳子强和王世炎, 1999, 图 1): 下部郭家窑组广泛发育有斜长角闪质岩石, 多已糜棱岩化, 岩石中可见杏仁构造和变余斑状结构。中部金家门组为条带状黑云和 (或) 角闪变粒岩、角闪片岩及磁铁石英岩透镜体, 顶部有变质石英钠长斑岩。上部老羊沟组有石榴黑云 (十字) 石英片岩, 偶含砾石, 地层顶部为绢云绿泥石石英片岩或含砾绿泥绢云石英片岩, 夹多层变质砾岩或含砾石英片岩, 具有复理石沉积特点。登封群的西边被新太古代 TTG 片麻岩侵入, 内部的斜长角闪岩包体大小不一, 有的长至 500 ~ 1200m, 数米宽, 小的长不足 10cm, 形状为不规则状、透镜状, 包体长轴方向平行 TTG 质岩石的片麻理, 部分包体中穿插有细小长英质岩脉。

登封群斜长角闪岩岩石类型有石榴黑云斜长角闪岩、角闪片岩及杏仁状角闪片岩, 具变余斑状结构, 角闪片岩具纤维状变晶结构, 片状、变余杏仁状构造。石榴黑云斜长角闪岩主要矿物为角闪石约 70% (粒径约 2mm)、斜长石约 25%、石英 3%, 有少量绿帘石。岩石大多糜棱岩化。角闪片岩或杏仁状角闪片岩具纤维状变晶结构, 主要矿物为角闪石约 90%, 斜长石 3% ~ 5%, 部分样品中含少量石英 (1% ~ 5%), 副矿物有磷灰石和磁铁矿等。

TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体岩石类型主要以黑云斜长角闪岩为主, 岩石结晶较登封群中的斜长角闪岩更为粗大, 呈绿色-浅绿色, 强烈拉伸成扁条状及透镜状, 主要矿物为角闪石 30% ~ 60%, 斜长石 40% ~ 60%, 黑云母含量可达 3% ~ 15%, 含或不含石英, 副矿物磷灰石、榍石和褐帘石等, 常出现绢云母化、绿帘石化和绿泥石化。

目前, 关于 TTG 的形成时代有不少年龄资料, 而登封群表壳岩的形成时代还不确定, 对于登封群的划分及其和 TTG 片麻岩的时空关系还存在争议。有关研究认为, 登封群表壳

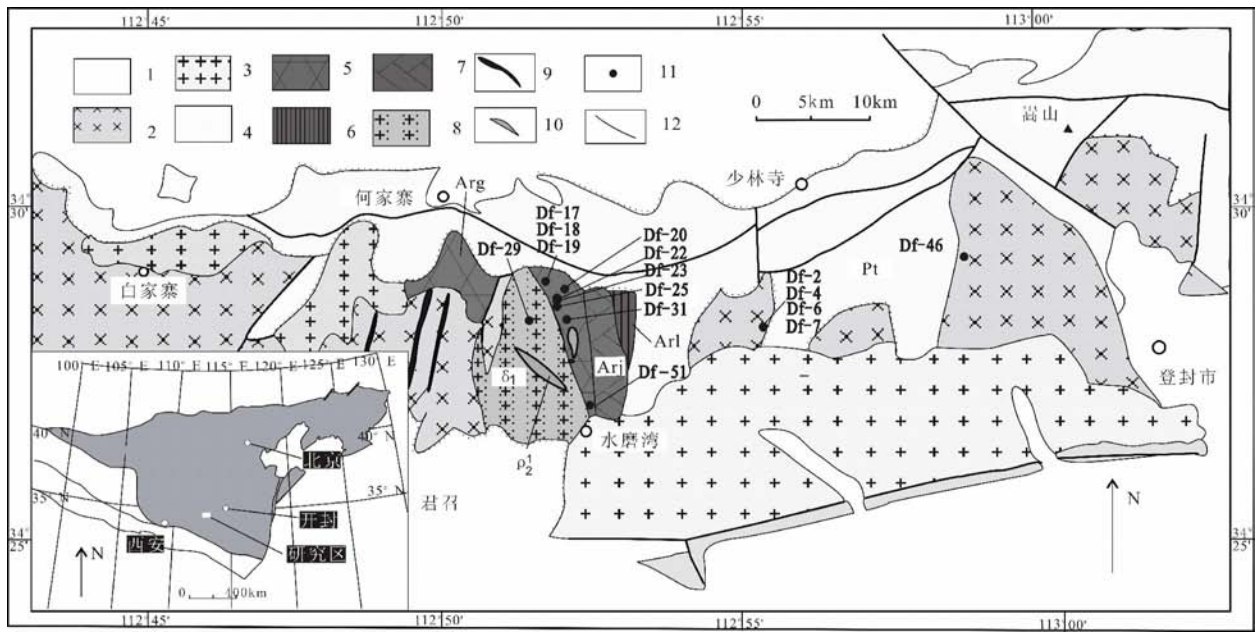


图1 嵩山地区登封群地质略图

1-显生宙地层,2-太古宙 TTG 质片麻岩,3-钾长花岗岩,4-元古宙地层,5-登封群郭家窑组 (Arg),6-登封群老羊沟组 (Arl),7-登封群金家门组 (Arj),8-青杨沟变辉长闪长岩,9-李家沟基性岩墙群(β_2^1),10-晋窑伟晶岩(ρ_2^1),11-取样位置,12-断层

Fig. 1 The geological map of Dengfeng Group in Songshan Area

1-Phanerozoic stratum, 2-Archean TTG gneisses, 3-moyite, 4-Proterozoic stratum, 5-Guojiayao Formation, Dengfeng Group (Arg), 6-Laoyanggou Formation, Dengfeng Group (Arl), 7-Jinjiamen Formation, Dengfeng Group (Arj), 8-Qingyanggou meta-gabbro, 9-Lijiagou basic dike swarm(β_2^1), 10-Jinyao pegmatite(ρ_2^1), 11-samples position, 12-fault

岩和 TTG 质片麻岩为侵入接触关系(孙枢等, 1985; Zhang *et al.*, 1985; 劳子强等, 1996), 并且, 孙枢等(1985)和 Zhang *et al.* (1985)认为“登封群”表壳岩应解体为新太古代绿岩地体和可能为元古宙最早期的安沟群。陈衍景等(1990)研究登封群时发现一套环绕“石碑河闪长质”岩体发育的底砾岩, 认为岩体是被周围的表壳岩不整合覆盖, 而非侵入周围的表壳岩; 并根据君召型绿岩下部拉斑玄武岩的 Sm-Nd 等时线年龄(2486Ma)、石碑河 Rb-Sr 等时线年龄 2997Ma (胡受奚和林潜龙, 1988; 陈衍景等, 1989)及石碑河变闪长岩中的锆石 U-Pb 等时线年龄 2520Ma (王泽九等, 1987)认为“登封群”应解体为 2550Ma 前的“石碑河杂岩”和 2550~2200Ma 的“君召群”绿岩。高山等(2005)获得可能为安沟群底部的玄武岩和英安岩的 Sm-Nd 等时线年龄为 2507 ± 96 Ma, 和登封群上部老羊沟组的变质流纹岩单颗粒锆石 Pb-Pb 年龄 (2512 ± 12 Ma, Kröner *et al.*, 1988)基本一致, 认为登封群能否划分出古元古代地层还需要更精确的锆石 U-Pb 年龄资料。这里我们根据登封群 3 件共 9 个玄武质岩石样品的 Sm-Nd 等时线年龄 (2616 ± 24 Ma, 陆松年(1994)重新处理李曙光等(1987)所测数据后的结果)、侵入到登封群中的 TTG 片麻岩的单颗粒锆石 Pb-Pb 年龄 ($2520 \pm 17 \sim 2563 \pm 4$ Ma, 劳子强和王世炎, 1999)及登封群酸性火山(沉积)岩、石英角斑岩和侵入到登封群的 TTG 片麻岩的年龄 (2508 ± 16 Ma, 2522

± 12 Ma 及 2530 ± 9 Ma, 万渝生等, 2006)认为登封群斜长角闪岩应形成于 2500~2600Ma 间, 为新太古代的产物。

3 样品采集及分析方法

所采的样品有两组, 一组采自登封群中、下部的斜长角闪岩样品共 9 个, 分别为 Df-17、Df-18、Df-19、Df-20、Df-22、Df-23、Df-25、Df-31、Df-51; 另一组采自会善寺片麻岩体内部的斜长角闪岩包体样品共 6 个, 分别为 Df-2、Df-4、Df-6、Df-7、Df-29、Df-46。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, 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)。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 LA-MC-ICPMS 质谱仪上进行, 详细的实验流程和分析方法见梁细荣等(2003)。

4 地球化学特征

4.1 主量元素特征

主、微量元素数据见表 1, 登封群斜长角闪岩 SiO_2 含量

表1 登封群斜长角闪岩及TTG杂岩中斜长角闪岩包体主量(wt%)、微量元素和稀土元素($\times 10^{-6}$)分析结果Table 1 Major (wt%), trace and rare earth element ($\times 10^{-6}$) composition of Dengfeng Group amphibolite and amphibolite enclaves in TTG gneiss

样品号	TTG片麻岩中的斜长角闪岩包体						登封群斜长角闪岩								
	Df-2	Df-4	Df-6	Df-7	Df-29	Df-46	Df-17	Df-18	Df-19	Df-20	Df-22	Df-23	Df-25	Df-31	Df-51
SiO ₂	46.73	53.13	54.29	56.54	47.38	49.10	47.69	48.18	48.04	48.64	49.70	48.92	47.79	50.11	48.56
TiO ₂	0.50	0.57	0.60	0.55	1.42	0.99	1.11	1.11	1.01	0.89	0.92	0.81	1.11	1.04	1.31
Al ₂ O ₃	15.93	13.33	14.30	13.27	15.35	13.62	15.62	15.23	15.65	15.59	14.30	15.61	15.01	14.17	14.85
Fe ₂ O ₃	10.83	10.17	10.56	9.74	13.65	14.72	12.42	13.18	11.27	11.63	12.68	10.66	12.17	14.24	13.52
MnO	0.17	0.19	0.17	0.16	0.17	0.20	0.21	0.20	0.17	0.17	0.20	0.17	0.17	0.25	0.18
MgO	8.72	8.85	7.67	7.20	7.88	7.12	7.19	7.98	8.03	8.76	7.80	7.38	8.68	6.60	7.30
CaO	4.11	8.35	6.90	8.20	9.42	10.58	10.78	9.98	9.94	10.12	11.62	11.64	8.60	10.69	10.32
Na ₂ O	4.51	2.64	2.48	2.17	2.89	2.22	3.74	2.54	3.61	2.35	2.10	2.79	3.59	2.29	2.08
K ₂ O	2.70	1.47	1.45	1.06	0.68	0.80	0.55	0.93	1.05	1.01	0.30	0.55	0.98	0.24	0.62
P ₂ O ₅	0.06	0.07	0.07	0.08	0.14	0.08	0.08	0.07	0.07	0.05	0.06	0.04	0.07	0.07	0.12
LOI	3.70	1.81	1.88	1.45	1.55	1.15	1.07	1.08	1.18	1.21	0.76	1.10	1.53	0.56	0.86
total	97.96	100.58	100.37	100.42	100.53	100.59	100.46	100.48	100.02	100.42	100.45	99.68	99.71	100.25	99.71
δ	13.95	1.67	1.37	0.77	2.91	1.50	3.93	2.32	4.31	2.00	0.86	1.88	4.36	0.90	1.31
Na ₂ O + K ₂ O	7.21	4.11	3.93	3.23	3.57	3.02	4.29	3.47	4.66	3.36	2.40	3.34	4.57	2.53	2.70
mg [#]	44.96	46.90	42.43	42.85	36.90	32.89	37.00	38.05	41.95	43.30	38.40	41.20	41.96	31.99	35.40
Sc	30.9	34.3	34.8	32.2	34.2	47.4	41.2	41.0	36.0	40.3	40.37	49.1	40.1	47.9	39.4
Ti	3088	3422	3588	3530	7745	5649	6543	6198	5754	5398	5604	4881	6691	5999	7053
V	125	189	194	175	306	281	308	296	278	266	275	264	308	322	290
Cr	242	374	242	238	95.1	167	198	188	179	265	208	38.1	226	82.9	153
Co	40.2	42.0	40.8	29.7	53.9	46.4	39.7	43.2	44.9	45.0	46.9	38.2	45.5	51.2	50.8
Ni	85.2	120	94.1	75.7	133	69.9	116	112	144	135	105	50.9	111	80.5	116
Mn	1336	1449	1311	1307	122	1492	1625	1434	1261	1323	1535	1375	1402	1897	1279
Cu	2.18	2.57	12.0	2.20	68.0	35.5	110	66.1	52.3	87.4	94.5	68.9	115	71.9	152
Zn	140	88.2	126	90.4	101	125	88.1	83.0	111	57.1	100	57.9	101	98.1	68.4
Ga	16.6	14.8	13.8	12.4	17.8	17.6	17.7	17.4	17.2	16.9	15.9	17.1	18.6	17.1	16.8
Ge	1.63	2.21	2.08	1.79	1.65	2.06	1.62	1.81	1.74	1.78	1.92	1.96	1.80	2.03	1.66
Cs	4.25	2.15	2.12	2.50	0.28	0.20	0.64	0.86	0.53	0.78	0.12	0.29	0.60	0.04	0.66
Rb	94.8	67.5	66.1	41.9	28.6	11.3	18.4	33.2	39.4	45.5	8.25	17.5	38.1	6.00	26.5
Sr	107	158	172	159	411	172	137	145	163	162	131	156	158	180	202
Ba	539	299	367	186	171	154	75.7	229	262	166	59.5	81.9	165	48.7	147
Th	1.33	2.07	2.69	2.39	0.43	0.43	0.31	0.26	0.25	0.20	0.22	0.16	0.30	0.23	0.42
U	0.23	0.44	0.53	0.57	0.08	0.13	0.08	0.07	0.06	0.05	0.06	0.04	0.08	0.06	0.09
Nb	2.21	3.20	2.84	2.79	2.98	2.52	2.78	2.54	2.44	1.94	2.18	1.66	2.86	2.40	2.67
Ta	0.13	0.22	0.24	0.22	0.10	0.19	0.20	0.18	0.18	0.13	0.16	0.11	0.21	0.17	0.19
Zr	39.8	62.6	72.8	68.3	60.2	50.6	68.3	60.9	60.4	47.3	52.1	42.4	67.1	57.9	59.3
Hf	1.19	1.93	2.13	1.92	1.73	1.58	2.09	1.87	1.78	1.44	1.56	1.28	1.98	1.78	1.77
Pb	4.18	5.58	47.9	5.34	10.7	2.48	4.23	2.43	9.82	0.61	1.37	1.14	2.71	2.25	2.41
Nb/Ta	16.5	14.7	11.77	12.5	16.0	13.1	13.9	13.9	13.9	14.6	13.9	14.9	13.8	13.9	13.9
Th/U	5.76	4.69	5.12	4.21	4.47	3.37	3.84	3.95	4.34	4.26	3.88	3.79	3.65	3.78	4.83
Nb/Th	1.67	1.55	1.06	1.17	6.87	5.89	9.11	9.73	9.67	9.69	10.0	10.2	9.45	10.6	6.42
La	8.77	9.78	5.66	12.6	7.18	4.36	3.93	3.34	3.08	2.77	2.92	2.11	3.61	2.85	6.15
Ce	16.7	21.8	12.4	28.2	17.2	11.3	11.4	9.63	9.17	8.04	8.13	6.38	10.3	8.75	15.5
Pr	2.01	2.67	1.80	3.43	2.45	1.71	1.74	1.61	1.51	1.27	1.38	1.03	1.68	1.42	2.20
Nd	7.81	11.0	7.65	13.6	10.9	8.53	9.23	8.17	7.83	6.24	6.96	5.53	8.56	7.42	10.3
Sm	1.87	2.32	1.97	2.83	2.72	2.59	2.79	2.57	2.43	1.94	2.11	1.82	2.65	2.38	2.72

续表 1

Continued Table 1

样品号	TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体						登封群斜长角闪岩								
	Df-2	Df-4	Df-6	Df-7	Df-29	Df-46	Df-17	Df-18	Df-19	Df-20	Df-22	Df-23	Df-25	Df-31	Df-51
Eu	0.72	0.76	0.62	0.64	1.04	0.93	1.01	0.96	0.93	0.77	0.81	0.71	0.88	0.82	1.05
Gd	2.36	2.50	2.30	2.85	3.18	3.37	3.67	3.35	3.12	2.56	2.79	2.46	3.41	3.16	3.26
Tb	0.46	0.43	0.43	0.48	0.58	0.66	0.69	0.65	0.60	0.51	0.53	0.48	0.67	0.62	0.63
Dy	3.18	2.69	2.69	2.96	3.55	4.30	4.59	4.10	3.96	3.22	3.56	3.14	4.39	4.18	3.88
Ho	0.71	0.55	0.55	0.60	0.77	0.92	0.98	0.86	0.82	0.71	0.74	0.66	0.89	0.87	0.81
Er	2.05	1.61	1.55	1.74	2.02	2.59	2.69	2.50	2.31	1.94	2.10	1.87	2.62	2.59	2.23
Tm	0.32	0.23	0.24	0.26	0.32	0.38	0.39	0.37	0.34	0.29	0.32	0.28	0.38	0.37	0.34
Yb	2.14	1.51	1.52	1.77	1.99	2.56	2.58	2.39	2.23	1.87	2.01	1.83	2.49	2.48	2.13
Lu	0.36	0.24	0.25	0.28	0.32	0.42	0.40	0.38	0.35	0.29	0.32	0.28	0.40	0.38	0.34
Y	19.5	16.1	15.6	17.6	21.9	26.1	25.8	23.3	22.4	19.9	20.7	18.8	25.4	25.0	23.5
ΣREE	56.3	67.9	92.6	82.1	67.2	49.2	53.0	45.6	50.7	34.8	38.0	31.3	48.1	42.7	56.3
δEu	0.85	0.67	0.73	0.46	0.87	0.46	0.99	1.01	1.02	1.01	0.93	1.03	0.95	0.97	1.01
Th/La	0.15	0.21	0.48	0.19	0.06	0.10	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.07
(La/Yb) _N	10.2	5.67	4.37	5.01	32.8	26.6	1.09	1.00	0.99	1.06	1.04	0.83	1.04	0.82	2.07
(Gd/Yb) _N	0.91	1.37	1.25	1.33	1.32	1.09	1.18	1.16	1.13	1.14	1.12	1.14	1.05	1.27	0.04
(La/Sm) _N	3.03	2.72	1.86	2.87	1.71	1.09	0.91	0.84	0.82	0.92	0.89	0.75	0.88	0.77	1.46
Ti/Zr	77.6	54.7	49.3	51.7	129	112	95.8	102	95.3	114	108	115	99.7	104	119

注: $Mg^{\#} = Mg^{2+} / (Mg^{2+} + Fe^{2+}) \times 100$, $\delta = [\omega(K_2O + Na_2O)^2] / [\omega(SiO_2) - 43]$, $\delta Eu = 2Eu_N / (Sm_N + Gd_N)$

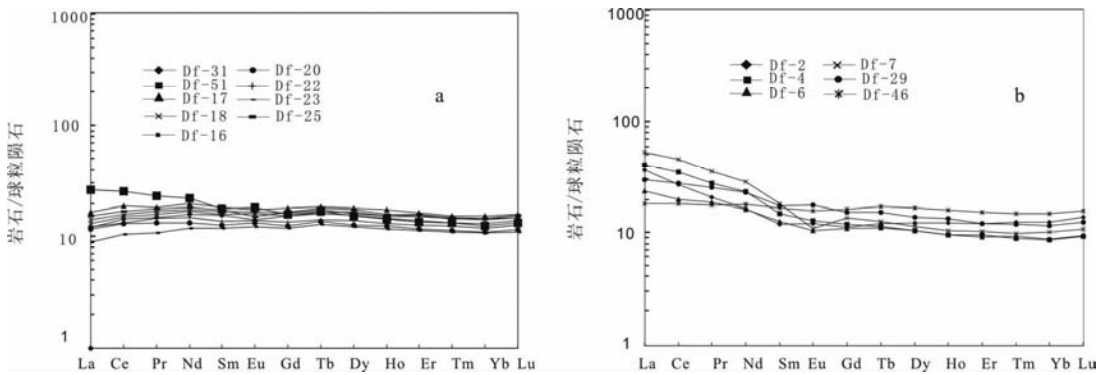


图2 斜长角闪岩稀土配分型式图(a)和TTG片麻岩中斜长角闪岩包体的REE配分型式图(b) (据Sun and McDonough, 1989)

Fig.2 REE distribution patterns of amphibolite in Dengfeng Group (a) and amphibolite enclaves in TTG gneiss (b) (from Sun and McDonough, 1989)

(平均48.63%)和 K_2O 含量(平均1.36%)较TTG片麻岩中的斜长角闪岩包体 SiO_2 (平均51.19%)和 K_2O 含量(平均0.69%)偏低,二者的其它主要元素含量差别不大,均较富 Fe_2O_3 (平均12.10%)、 Al_2O_3 (平均14.79%)、 MgO (6.60%~8.72%),低 TiO_2 (0.81%~1.42%), $Mg^{\#} = Mg^{2+} / (Mg^{2+} + Fe^{2+}) \times 100 = 32.0 \sim 46.90$ 。($K_2O + Na_2O$) = 2.40%~4.11%,碱度 $\delta = [\omega(K_2O + Na_2O)^2] / [\omega(SiO_2) - 43] = 0.77 \sim 2.91$,显示亚碱性玄武岩特征($\delta < 3.3$)。少数样品 K_2O 和 Na_2O 含量较高,可能是因为遭受后期地质作用的影响。

4.2 微量元素特征

登封群斜长角闪岩轻重稀土基本无分异($(La/Yb)_N = 0.82 \sim 2.07$) (图2a),无Eu异常($\delta Eu = 2Eu_N / (Sm_N + Gd_N) \approx 1$)。TTG片麻岩中的斜长角闪岩包体稀土总量略高($49.4 \times 10^{-6} \sim 92.6 \times 10^{-6}$),稀土配分型式显示弱的轻稀土富集($(La/Yb)_N = 1.71 \sim 7.14$),重稀土平坦($(Gd/Yb)_N = 0.91 \sim 1.37$) (图2b),Eu负异常明显($\delta Eu = 2Eu_N / (Sm_N + Gd_N) = 0.46 \sim 0.87$)。

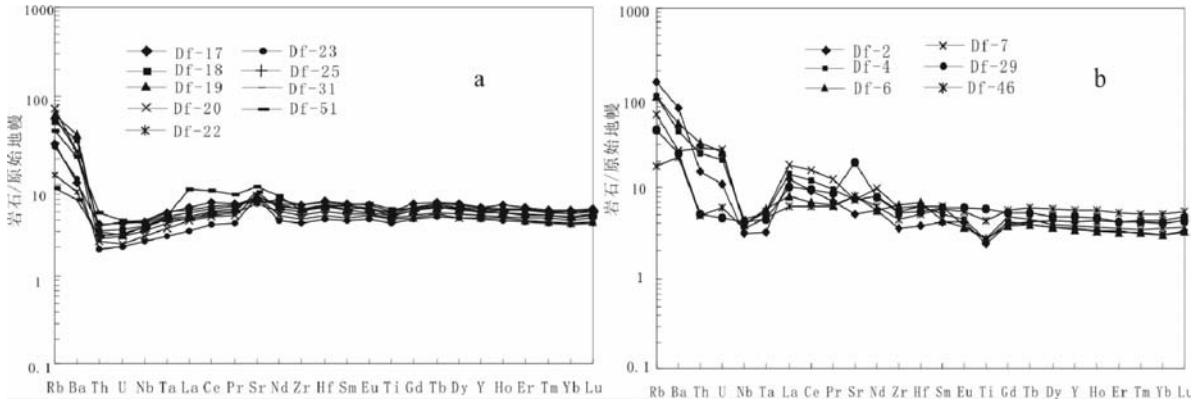


图3 登封群斜长角闪岩(a)和斜长角闪岩包体微量元素蛛网图(b) (据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.3 The spider diagrams of amphibolite in Dengfeng Group (a) and amphibolite enclaves in TTG gneiss (b) (from Sun and McDonough, 1989)

表2 登封群斜长角闪岩及 TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体 Nd 同位素分析结果

Table 2 Nd isotopic compositions of Dengfeng Group amphibolite and amphibolite enclaves in TTG gneiss

样品编号	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\text{Sm} (\times 10^{-6})$	$\text{Nd} (\times 10^{-6})$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}(\text{C})$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$t_{2\text{DM}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$
Df-4	0.511609	2.316	11.03	0.126992	2.56	2722	-0.35
Df-46	0.512648	2.591	8.526	0.1837951	4.43	2599	-0.03
Df-18	0.512771	2.567	8.172	0.1899806	4.08	2570	-0.06

$\lambda = 6.54 \times 10^{-12}$ (Lugmair and Marti, 1978), $t = 2550\text{Ma}$, $[^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}]_{\text{CHUR}} = 0.1967$ (Peucat *et al.*, 1988), $[^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}]_{\text{CHUR}} = 0.512638$ (Goldstein *et al.*, 1984), 取 $[^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}]_{\text{DM}} = 0.513151$, $[^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}]_{\text{DM}} = 0.2136$ (Miller *et al.*, 1985)

登封群斜长角闪岩和 TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体的微量元素蛛网图见图 3a、b。二者贫 Rb(前者 $6 \times 10^{-6} \sim 45.5 \times 10^{-6}$, 后者 $11.3 \times 10^{-6} \sim 94.8 \times 10^{-6}$), Sr(前者 $131 \times 10^{-6} \sim 202 \times 10^{-6}$, 后者 $107 \times 10^{-6} \sim 411 \times 10^{-6}$), 具较低的 Rb/Sr 比值(前者 0.03 ~ 0.28, 后者 0.07 ~ 0.89)。其中登封群斜长角闪岩的大离子亲石元素明显低于 TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体, 高场强元素显示 Ti、Th 负异常, Nb、Ta、Y 无异常或负异常不明显, Zr/Nb = 22.3 ~ 25.6, Ti/Zr (95.3 ~ 119, 平均 105) 和 Zr/Y (2.25 ~ 2.69) 接近球粒陨石的该比值(分别为 116 和 2.46), Nb/Ta = 13.8 ~ 14.9, Th/U = 3.65 ~ 4.83。TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体的高场强元素除了 Ti(平均 4503×10^{-6}) 含量较低外, Zr、Nb 和 Y 含量范围和登封群斜长角闪岩基本相似, 但 Nb、Ta、Ti 和 Y 呈明显负异常, Th/Nb = 0.09 ~ 0.16, Ti/Zr (49.3 ~ 129, 平均 78.9) 较球粒陨石偏低(116), Zr/Nb = 18.0 ~ 25.6, Zr/Y = 1.94 ~ 3.89, La/Nb = 1.73 ~ 4.52。

5 Nd 同位素特征

李献华(1996)提出, 计算 Nd 模式年龄最主要和最直接的依据是样品从地幔分离进入大陆地壳后在很短的时间里具有类似大陆地壳的 Sm/Nd 比值。太古宙后大陆地壳的 Sm/Nd 平均值约为 0.19 (McLennan and Hemming, 1992), 相

当于 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} \approx 0.115$, $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} = (\text{Sm}/\text{Nd}) / (\text{Sm}/\text{Nd})_{\text{CHUR}} - 1 \approx 0.4$ 。对于 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} = -0.3 \sim -0.4$ 之间的样品, 用单阶段模式年龄计算 t_{DM} 是合适的。但对于和大陆地壳 Sm/Nd 比值相差较大的样品, $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} < -0.5$ 和 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} > -0.3$, 用单阶段模式年龄计算 t_{DM} 就会产生较大的偏差, 应采用两阶段模式年龄来计算 t_{DM} 。

本次工作 Nd 同位素分析结果见表 2。登封群斜长角闪岩样品 Df-18 采自登封群底部, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512771$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.19$, $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} = -0.03$, 大于 -0.3, 因此要采用两阶段模式年龄计算 t_{DM} 。取 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.513151$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.2136$, $t = 2550\text{Ma}$, 得 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = 4.43$, $t_{2\text{DM}} = 2570\text{Ma}$ 。

两件斜长角闪岩包体样品 Df-4、Df-46 分别采自会善寺奥长花岗质片麻岩和大塔寺英云闪长质片麻岩中。 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 分别为 0.511609 和 0.512648, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值分别为 0.18 和 0.13, $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 分别为 -0.35 和 -0.06, 样品 Df-4 的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值和 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 显示其均适合用单阶段模式年龄来计算 t_{DM} , 但由于其 Sm/Nd 比值(0.21) 大于大陆地壳的该比值(约 0.19), 因此仍然采用两阶段模式年龄计算。样品 Df-46 的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.18$, $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} = -0.13$, 大于 -0.3, 适合采用两阶段模式年龄计算 t_{DM} 。取 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.513151$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.2136$, $t = 2550\text{Ma}$, 得出 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 分别为 2.25 和 4.08, $t_{2\text{DM}}$ 分别为 2722Ma 和 2599Ma。

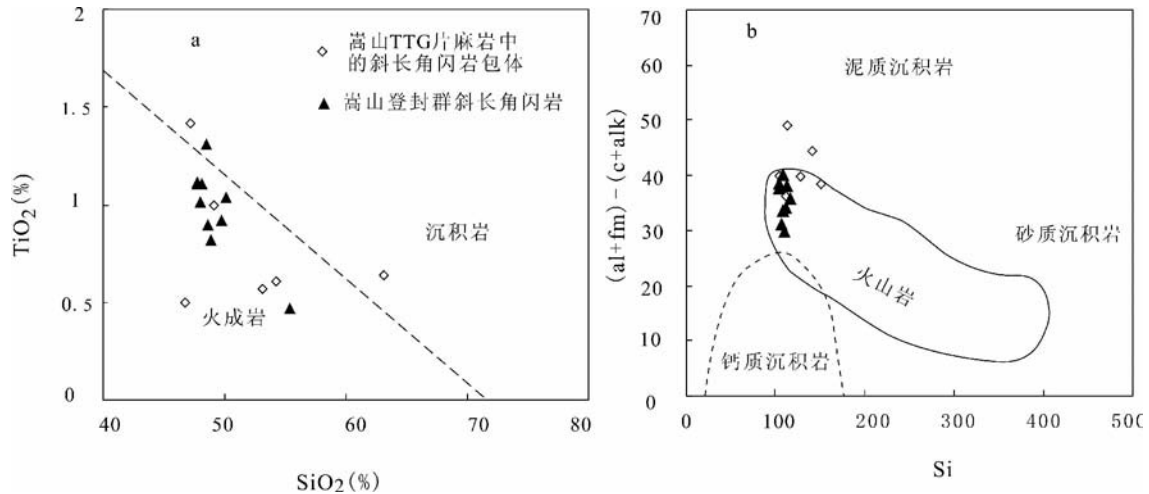


图4 登封群斜长角闪岩及 TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体的 TiO_2 - SiO_2 (a) 及 $(\text{al} + \text{fm}) - (\text{c} + \text{alk}) - \text{Si}$ 图解 (b, 据 Simonen, 1953)

$\text{Sum} = \text{mol} [\text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO}] + \text{mol} (\text{MgO}) + \text{mol} (\text{MnO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$; $\text{al} = 100 \times \text{mol} (\text{Al}_2\text{O}_3) / \text{sum}$; $\text{c} = 100 \times \text{mol} (\text{CaO}) / \text{Sum}$; $\text{fm} = 100 \times \text{mol} (2\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MgO} + \text{MnO}) / \text{Sum}$; $\text{alk} = 100 \times \text{mol} (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) / \text{Sum}$; $\text{Si} = 100 \times \text{mol} (\text{SiO}_2)$

Fig. 4 the diagrams of TiO_2 - SiO_2 (a) and $(\text{al} + \text{fm}) - (\text{c} + \text{alk}) - \text{Si}$ (b, after Simonen, 1953) of amphibolite in Dengfeng Group and amphibolite enclaves in TTG gneiss

$\text{Sum} = \text{mol} [\text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO}] + \text{mol} (\text{MgO}) + \text{mol} (\text{MnO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$; $\text{al} = 100 \times \text{mol} (\text{Al}_2\text{O}_3) / \text{sum}$; $\text{c} = 100 \times \text{mol} (\text{CaO}) / \text{Sum}$; $\text{fm} = 100 \times \text{mol} (2\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MgO} + \text{MnO}) / \text{Sum}$; $\text{alk} = 100 \times \text{mol} (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) / \text{Sum}$; $\text{Si} = 100 \times \text{mol} (\text{SiO}_2)$

6 讨论

6.1 原岩恢复

登封群斜长角闪岩及 TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体可见到变余斑状结构、杏仁状构造, 显示基性火山岩特征。二者主量元素差别不大 (表 1), 在原岩恢复图解 TiO_2 - SiO_2 (图 4a) 和 $(\text{al} + \text{fm}) - (\text{c} + \text{alk}) - \text{SiO}_2$ (图 4b) 中, 均落入火成岩区域, 说明原岩属正变质岩。

登封群斜长角闪岩属亚碱性玄武岩系列 (图 5a), 具有拉斑玄武岩特征, 和典型拉斑玄武岩演化趋势相近 (图 5b)。TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体大部分属亚碱性玄武岩系列 (图 5a), 在 SiO_2 - FeO^*/MgO 图解 (图 5b) 中部分样品显示钙碱性系列玄武岩特征, 并有从拉斑玄武岩向钙碱性玄武岩过渡的趋势 (图 7, 8)。在 SiO_2 - Nb/Y 图解中 (图 6a), 有三个样品落入安山岩区域, 但从图 5, 6a 看出这三个落入安山岩区域的样品 Nb/Y 及 FeO^*/MgO 比值和其它样品差别不大, 只是 SiO_2 含量较高 ($>53\%$), 可能是受到后期地质作用的影响。在判别热液蚀变程度的 Al-CCPI 图解中 (图 6b), 样品基本落入中间方框弱热液蚀变区域, 说明, 以上主量元素组分特征大致反映原岩成分。

6.2 构造环境: 汇聚板块边缘环境?

多年来, 在登封群地质构造背景的研究方面有了不少进

展, 但也存在一些争议: 1) 沈保丰和骆辉 (1994)、白瑾等 (1993)、伍家善等 (1998) 认为登封 TTG 片麻岩和登封群表壳岩整体属于太古宙花岗-绿岩地体, 形成于古岛弧环境; 2) 张国伟等 (1982) 和李曙光等 (1987) 认为属裂谷型小绿岩带; 3) 高山等 (2005) 认为登封群顶部可能为元古宙早期的安沟群形成于陆内裂谷环境, 认为太古宙末或元古宙初期至少华北克拉通南缘已进入陆内伸展阶段。我们认为登封群的形成与汇聚板块边缘环境有关, 证据如下。

6.2.1 火山-沉积建造方面的证据

登封群沉积岩主要有 多层变质砾岩或含砾石英片岩, 具有明显的泥质和砂质的韵律性沉积, 具有复理石沉积特点 (劳子强, 1989)。复理石主要由重力流沉积组成, 重力流中又以浊积岩最为发育, 其构造背景与能提供大量物源的大陆边缘和火山岛弧有密切关系 (万国庆和刘德良, 2000)。一般在显生宙造山带, 出现洋中脊玄武岩和岛弧派生的弧沟构造浊积岩是古老俯冲带存在的证据 (Isozaki *et al.*, 1990; Polat *et al.*, 1996; Kusky *et al.*, 1997)。相似的, 在不同绿岩带出现洋壳碎片和岛弧派生的浊积岩被认为是太古宙俯冲增生杂岩体 (Hoffman, 1991; Kimura *et al.*, 1993)。

6.2.2 斜长角闪岩地球化学方面的证据

①登封群斜长角闪岩 MgO (平均 7.75%)、 Th (平均 0.26×10^{-6})、 Nb (平均 2.39×10^{-6}) 和原始地幔玄武岩的 MgO (7.64%)、 Th (0.29×10^{-6})、 Nb (2.39×10^{-6}) 相近, 表明其可能形成在洋内环境 (Kerrick *et al.*, 2008)。在判别热液蚀变程度的 Al-CCPI 图解中 (图 6b), 左下方为区域成岩蚀变,

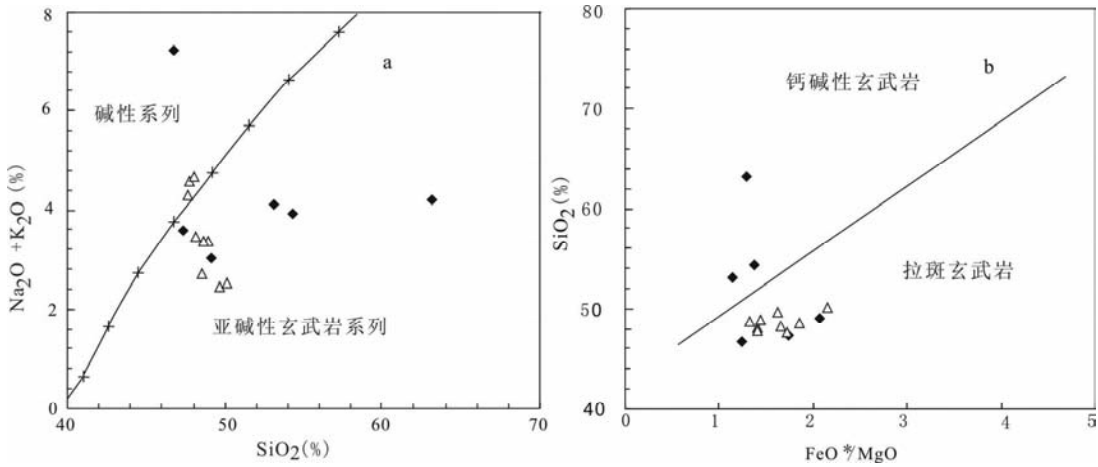


图5 登封群斜长角闪岩和 TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体的全碱-硅图解 (TAS) (a, 据 Maitre *et al.*, 1989) 和 SiO₂-FeO*/MgO 图解 (b, 据 Miyashiro, 1974)

△ 登封群斜长角闪岩; ◆ TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体

Fig. 5 the total alkalis versus silica (TAS) (a, from Maitre *et al.*, 1989) and SiO₂-FeO*/MgO (b, from Miyashiro, 1974) diagrams of amphibolite in Dengfeng Group and amphibolite enclaves in TTG gneiss

△ amphibolite in DengfengGroup; ◆ amphibolite enclaves in TTG gneiss

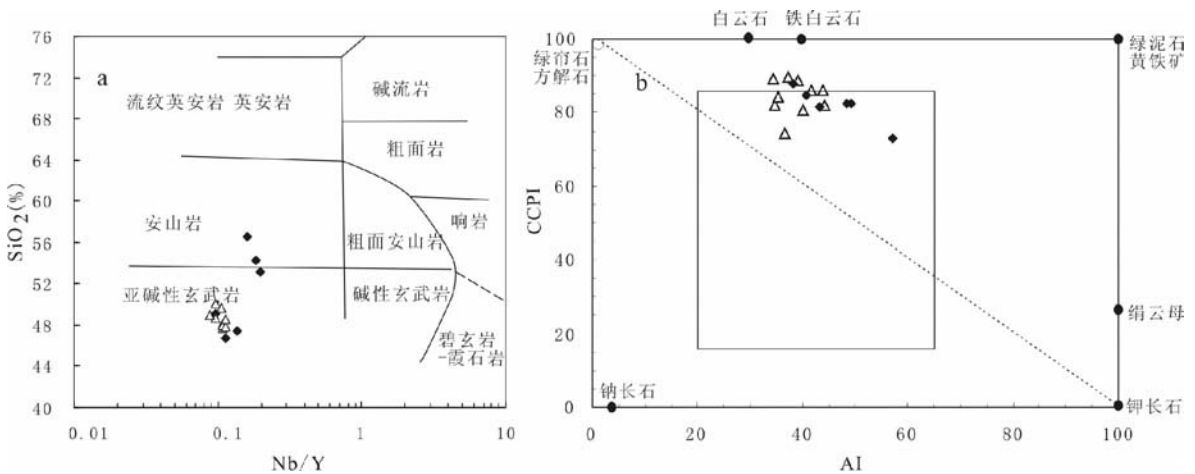


图6 登封群斜长角闪岩和 TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体的 SiO₂-Nb/Y 图解 (a, 据 Winchester and Floyd, 1977) 和 AI-CCPI 图解 (b, 据 Large *et al.*, 2001)

△ 嵩山地区登封群斜长角闪岩; ◆ TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体

AI = 100 (K₂O + MgO) / (K₂O + Na₂O + MgO + CaO); CCPI = 100 (K₂O + MgO) / (MgO + FeO* + Na₂O + K₂O)

Fig. 6 the SiO₂-Nb/Y diagram (a, from Winchester and Floyd, 1977) and the AI-CCPI diagram of amphibolite in Dengfeng Group and amphibolite enclaves in TTG (b, from Large *et al.*, 2001)

△ amphibolite in Dengfeng Group; ◆ amphibolite enclaves in TTG gneiss

AI = 100 (K₂O + MgO) / (K₂O + Na₂O + MgO + CaO); CCPI = 100 (FeO* + MgO) / (MgO + FeO* + Na₂O + K₂O)

右上方为热液蚀变,中间方框为弱蚀变区域,登封群斜长角闪岩基本落入弱热液蚀变区域,所以,其 REE 是不活跃的 (Whitford *et al.*, 1988),可以反映源区组分特征。高场强元素如 Th、Nb、Ta、Zr 等一般都是不活动的 (MacLean, 1990; Kerrich and Wyman, 1996; Barrett and MacLean, 1999)。因此,REE 配分型平坦,Nb、Ta 无异常或负异常不明显,

Zr/Nb = 22.3 ~ 25.6, Nb/Ta = 13.8 ~ 14.9, 与 E-MORB 相当。 $\varepsilon_{Nd}(t) = 4.43$, 说明斜长角闪岩原岩来自亏损地幔源区。出现大离子亲石元素正异常可能是受到后期一定程度的变质改造所致。

在 Th/Yb-Ta/Yb (图 7a) 及构造环境判别图解 (图 8) 中, 登封群斜长角闪岩多集中于从洋中脊玄武岩到岛弧玄武岩

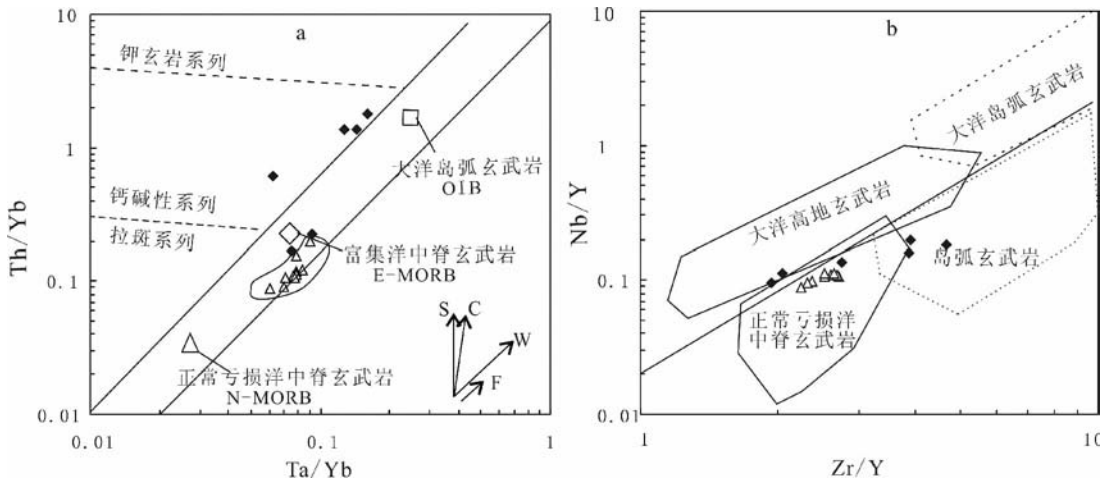


图7 登封群斜长角闪岩及 TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体的 Ta/Yb-Th/Yb 图解(a,据 Pearce, 1983, N-MORB、E-MORB 和 OIB 区域据 Sun and McDonough, 1989)和 Nb/Y-Zr/Y 图解(b,据 Condie, 2005)

S-消减作用趋势; C-陆壳混染趋势; W-板内富集趋势; F-分离结晶作用趋势
 △ 登封群斜长角闪岩; ◆ TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体

Fig.7 diagrams of Ta/Yb-Th/Yb (a, from Pearce, 1983, the fields of N-MORB, E-MORB and OIB from Sun and McDonough, 1989) and Nb/Y-Zr/Y (b, from Condie, 2005) of amphibolite in Dengfeng Group and amphibolite enclaves in TTG gneiss

S-subduction trend; C-continental contamination trend; W-within plate enriching trend; F-fractional crystallization trend.
 △ amphibolite in Dengfeng Group; ◆ amphibolite enclaves in TTG gneiss

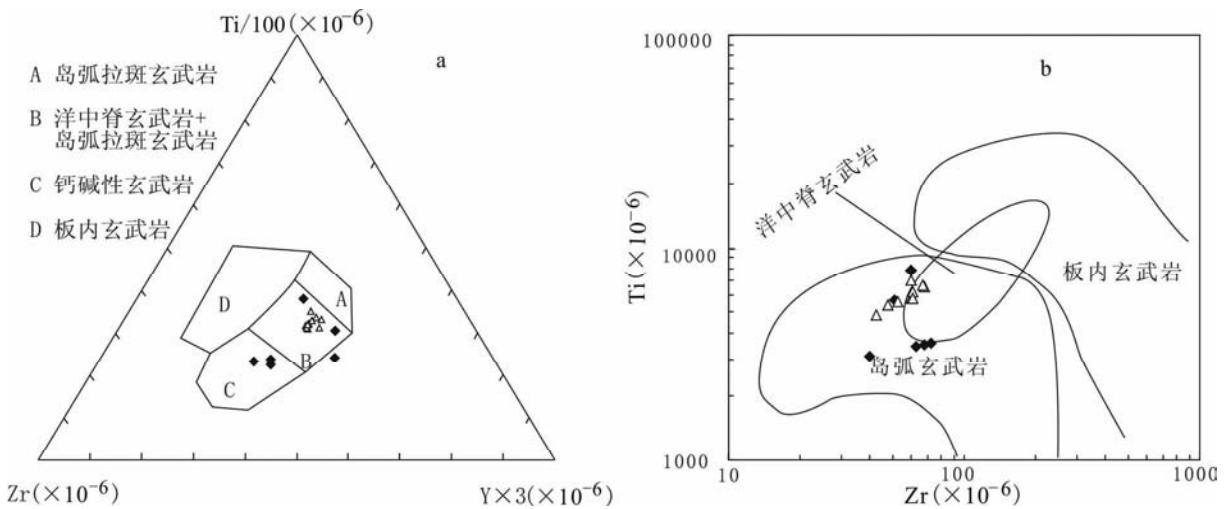


图8 嵩山地区登封群斜长角闪岩和 TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体的 Ti/100-Zr-3Y 图解(a)和 Ti-Zr 图解(b) (据 Pearce and Cann, 1973)

△ 嵩山地区登封群斜长角闪岩; ◆ TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体

Fig.8 the diagrams of Ti/100-Zr-3Y (a) and Ti-Zr (b) of amphibolite in Dengfeng Group and amphibolite enclaves in TTG gneiss (from Pearce and Cann, 1973)

△ amphibolite in Dengfeng Group; ◆ amphibolite enclaves in TTG gneiss

的过渡区域 (E-MORB 区域)。其中, Nb/Y-Zr/Y 图解 (图7b)能够强烈反映部分熔融和分离结晶变化, Wyman (2003)和 Wyman and Hollings(2006)曾以此识别出不同组分火成岩序列中的两个地幔端元: 洋中脊玄武岩 (MORB)-洋

岛玄武岩(OIB)。他们利用 BlakeRiver Group 钙碱性玄武-安山岩和 Kidd-Munro-Malartic 科马提岩及拉斑玄武岩投图, 样品点穿过洋中脊玄武岩 (MORB)-洋岛玄武岩 (OIB) 区域, 其分别被解释为亏损岩石圈地幔和来自汇聚板块边缘由板

片熔融形成的埃达克质熔体 (Wyman and Hollings, 2006)。相反,登封群斜长角闪岩基本落入洋中脊玄武岩区域,和没有发现埃达克组分的地幔楔一致 (Polat *et al.*, 1998)。

②TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体在 Al-CCPI 图解中 (图 6b) 基本落入弱热液蚀变区域,说明其 REE 和高场强元素等地球化学特征基本反映原岩性质。包体的 Rb/Sr 比值 (0.07 ~ 0.89) 较低,高场强元素如 Nb、Ta、Ti 明显负异常,具有岛弧玄武岩特征。Ta/Yb 变化小,而 Th/Yb 升高,具俯冲作用趋势 (图 7a, Sun and McDonough, 1989; Pearce and Peate, 1995; Rudnick and Gao, 2004),反映受到俯冲作用影响 (Ryerson and Watson, 1987)。轻稀土富集 ($(La/Yb)_N = 1.71 \sim 7.14$) (图 2b),重稀土分布模式平坦 ($(Gd/Yb)_N = 0.91 \sim 1.37$),一般在岩石圈地幔,石榴橄榄岩在大于 90km 的深度才能稳定,而在约 7km 厚的大洋岩石圈 (Hirschmann and Stolper, 1996),具有轻重稀土分异的原因应该是在小于 90km 的情况下产生了尖晶石橄榄岩熔体,而不是在更深条件下生成了石榴橄榄岩熔体,这支持俯冲的构造环境和亏损地幔源区。

6.2.3 来自 TTG 片麻岩的证据

一般,TTG 质岩石中基性包体的出现表明大体在 TTG 质岩石熔融 (熔浆固结前) 的同时有玄武质岩浆的活动 (张旗等, 2008)。而且,登封群斜长角闪岩 Nd 同位素模式年龄为 2570Ma,TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体的 Nd 同位素最大模式年龄为 2722Ma,已有的在空间上侵入到登封群表壳岩的 TTG 片麻岩的形成年龄为 2500 ~ 2600Ma,说明登封群变质中基性火山岩和 TTG 片麻岩形成年龄相当,是在较短的时间间隔内形成。因此,二者的大地构造背景应相同或形成一个连续演化的过程。

经研究,嵩山地区新太古代 TTG 片麻岩源岩具岛弧玄武岩特征,微量元素比值等特征与受俯冲板片含水熔体影响的镁铁质岩石相似; $Mg^{\#}$ 值变化较大 (7.71 ~ 56.9),表明有地幔楔不同程度的卷入;全岩 Nd 和锆石 Hf 同位素特征显示岩石源岩来自亏损地幔。而且,嵩山地区 TTG 质岩石基本上是富钠低钾, Na_2O/K_2O 一般 > 1,而如果是加厚玄武质地壳部分熔融形成的熔体一般更富钾 (Martin, 1987)。以上特征说明,嵩山地区 TTG 质片麻岩是由 2.66Ga 的初生玄武质洋壳在低角度俯冲条件下部分熔融形成,而非加厚玄武质地壳部分熔融形成 (周艳艳等, 2009)。

因此,我们认为登封群的形成与汇聚板块边缘环境有关,受俯冲作用影响,指示可能形成于岛弧或弧后盆地环境。在构造环境判别图解中 (图 8),登封群斜长角闪岩多集中于从洋中脊-岛弧玄武岩的过渡区域,根据 Taylor and Martinez (2003) 对比研究四个弧后盆地玄武岩地球化学等特征后得出的认识:弧后盆地能产生既有洋中脊玄武岩性质 (MORB-like) 也有岛弧玄武岩性质 (Arc-like) 的玄武岩。并且,TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体地球化学特征显示岛弧玄武岩特征,其原岩玄武质岩浆受到俯冲作用中派生流体的影响显

著,表明当时的登封群处于拉张初期的弧后盆地环境。结合复理石建造及地幔楔的存在 (如:沈保丰和骆辉, 1994; Polat *et al.*, 1998; Hollings and Kerrich, 2000; Kerrich and Xie, 2002; Polat and Kerrich, 2001, 2006),说明当时的地球动力学背景为汇聚板块边缘的俯冲环境。

6.3 源区性质及成因机制

6.3.1 源区性质

登封群斜长角闪岩稀土模式平坦 (图 2a),基本无 Eu 异常 (δEu 为 ~1)。中等不相容元素 Ce 从无异常到弱的负异常、Nb/Ta (13.8 ~ 14.9) 接近原始地幔比值 (17) (Sun and McDonough, 1989),Zr/Nb (22.3 ~ 25.6) 比值在 MORB (平均 32) 和现代原始地幔岛弧拉斑玄武岩的 (9 ~ 87) 该比值范围内,Ti/Zr (95.3 ~ 119,平均 105)、Zr/Y (2.25 ~ 2.69,平均 2.51) 比值接近球粒陨石 (分别为 116 和 2.46)。 $\epsilon_{Nd}(t) = 4.43$,说明斜长角闪岩源岩应该来源于亏损地幔 (Polat *et al.*, 1998, 1999)。

TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体显示弱的轻稀土富集 ($(La/Yb)_N = 1.71 \sim 7.14$) (图 2b),重稀土分布模式平坦 ($(Gd/Yb)_N = 0.91 \sim 1.37$) (图 2b),Eu 负异常 ($\delta Eu = 0.46 \sim 0.87$) 记录了斜长石的结晶分异。负的 Ti 异常可能是 Fe-Ti 氧化物的分离结晶造成的 (Fowler and Jensen, 1988)。这些特征基本和 Pearce and Peate (1995) 及 Rudnick and Gao (2004) 提出的岛弧玄武岩特征类似。两个样品的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 分别为 2.56 和 4.08, t_{2DM} 分别为 2722Ma 和 2599Ma,说明其源岩来自亏损地幔,最老模式年龄比登封群的形成年龄 (约 2600Ma) 稍大,Nb/La (0.57 ~ 0.22) 也小于 1 (1 为原始地幔值,Weaver, 1991),说明可能有较老陆壳物质的混染。

6.3.2 斜长角闪岩的成因机制

一般,在汇聚板块边缘,含水板片组分和地幔楔都容易产生岛弧玄武质岩浆 (Perfit *et al.*, 1980; Sun and McDonough, 1989; Hawkesworth *et al.*, 1993; Pearce and Peate, 1995)。但是在板块本身发生脱水反应时,地幔楔部分熔融,高场强元素和重稀土元素是不活跃的,产生的玄武岩反映地幔楔组分特征;随着俯冲作用的进行,板片熔融开始发生并产生埃达克质熔体,大离子亲石元素如 Cs、Ba、Rb、K、Pb 和轻稀土元素受到影响 (McCulloch and Gamble, 1991; Woodhead *et al.*, 1993; Gamble *et al.*, 1994; Pearce *et al.*, 2000),Th、Nb 和 Zr 等元素表现活跃 (Pearce and Peate, 1995; Drummond *et al.*, 1996; Hawkesworth *et al.*, 1997; Plank, 2005)。

①登封群斜长角闪岩轻重稀土基本无分异 ($(La/Yb)_N = 0.82 \sim 2.07$) (图 2a),La/Nb (1.19 ~ 2.31) 接近地幔,并且 La/Sm-La 具有很好的线性相关性,符合部分熔融特征。 $Mg^{\#}$ ($Mg^{\#} = Mg^{2+} / (Mg^{2+} + Fe^{2+}) \times 100 = 32 \sim 42$,Th/U = (3.65 ~ 4.82) 介于洋内岛弧玄武岩 Th/U 比值 (3 ~ 5) 范围内 (Hawkesworth *et al.*, 1997; Polat and Kerrich, 2000, 2001;

Kerrick and Xie, 2002), $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = 4.43$, 说明斜长角闪岩原岩反映的是亏损地幔组分特征(如 Sun and McDonough, 1989; Bennett, 2004), 是地幔楔部分熔融形成。

②TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体的 $\text{Mg}^\#$ ($\text{Mg}^\# = \text{Mg}^{2+} / (\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+}) \times 100 = 33 \sim 47$, 轻稀土富集, $\text{La}/\text{Nb} = 1.73 \sim 4.52$, 并且 $\text{La}/\text{Sm}-\text{La}$ 也具有一定的线性相关性, 符合部分熔融特征。 $\text{Th}/\text{Nb} = 0.09 \sim 0.16$, $\text{Ti}/\text{Zr} (49.3 \sim 129$, 平均 78.9) 较球粒陨石偏低 (116), $\text{Zr}/\text{Nb} = 18.0 \sim 25.6$, $\text{Zr}/\text{Y} = 1.94 \sim 3.89$, Th/U 比值 $= 3.37 \sim 5.76$, 均显示岛弧环境特征 (Sun and McDonough, 1989)。大离子亲石元素 (Cs、Ba、Rb、K、Pb) 和轻稀土是受到影响的 (McCulloch and Gamble, 1991; Woodhead *et al.*, 1993; Gamble *et al.*, 1994; Pearce *et al.*, 2000), 不活动、不相容元素 P 含量也并不比表壳岩中的斜长角闪岩高, 相容元素 Cr 含量也不低, 两个样品的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = 2.56$ 和 4.08。说明斜长角闪岩原岩岩浆来源于亏损地幔, 并且受到板片熔融产生埃达克质熔体的影响。

TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体位于 TTG 片麻岩体内部, 和登封群斜长角闪岩并没有明确的地质关系。因此我们认为, 登封群斜长角闪岩和 TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体源区物质来源有所不同: 1) 在汇聚板块边缘, 洋壳及上覆沉积物在岛弧环境下俯冲, 到达一定深度发生脱水, 流体上升交代上覆亏损的地幔楔, 引起亏损地幔部分熔融, 形成稀土平坦型甚或亏损型的玄武质岩浆 (万渝生和吴澄宇, 1997), 通过弧后盆地扩张中心喷出, 形成既有洋中脊性质也有岛弧性质的拉斑玄武岩 (图 8); 2) 随着俯冲作用的进行, 可能小部分板片熔融开始发生并形成 TTG 质熔浆, 亏损地幔部分熔融形成的玄武质熔浆由于粘性低、温度高, 混合 TTG 熔浆, 并较快吸收、消化少量 TTG 质熔浆组分 (Castro, 2001), 形成现在具有轻稀土轻微富集等特征的玄武质岩石, 并被随后的板片熔融形成的 TTG 岩浆包裹或作为捕虏体带出, 是花岗岩-绿岩地体的过渡端元。

综上所述, 嵩山地区新太古代花岗-绿岩带物质组成、登封群斜长角闪岩及 TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体的地球化学特征显示其形成的动力学背景均是汇聚板块边缘洋壳的俯冲, 该构造运动与现代板块运动虽然在类型和规模上有差别, 但基本型式是相似的 (Zhai and Windley, 1990), 反映当时陆壳以水平方式增生。

7 结论

登封群斜长角闪岩及 TTG 片麻岩中的斜长角闪岩包体的地球化学和 Nd 同位素特征说明前者属于洋中脊向岛弧拉斑玄武岩的过渡类型, 形成于弧后盆地环境, 源岩来自于亏损程度较高的地幔, 是在俯冲条件下地幔楔部分熔融产生, 并通过弧后盆地扩张中心喷出。后者具有岛弧玄武岩特征, 源岩来自亏损地幔, 有地壳物质的混染, 其可能是随着俯冲作用的进行, 小部分板片开始熔融形成 TTG 质熔浆, 亏损地

幔部分熔融形成的熔浆混合 TTG 熔浆, 并被随后形成的 TTG 岩浆包裹或作为捕虏体形成斜长角闪岩包体, 是花岗岩-绿岩地体的过渡端元。

致谢 论文写作过程中得到陈衍景研究员的帮助, 成文后承蒙张旗研究员、郭敬辉研究员和一位匿名评审专家提出宝贵评审意见, 在此对他们一并表示衷心感谢!

References

- Ayres LD and Thurston PC. 1985. Archean supracrustal sequences in the Canadian Shield: An overview. *Geological Society of Canada Special Paper*, 28; 343–380
- Bai J, Huang GX, Dai FY and Wu CH. 1993. The Precambrian crustal evolution of China. Beijing: Geological Publishing House, 199–203 (in Chinese)
- Barrett TJ and MacLean WH. 1999. Volcanic sequences, lithochemistry and hydrothermal alteration in some bimodal volcanic-associated massive sulfide systems; *Reviews in Economic Geology*, 8; 101–131
- Bennett. 2004. Granitic rocks of Tertiary age in the Idaho Batholith and their relation to mineralization. *Economic Geology*, 75 (2); 278–288
- Castro A. 2001. Plagioclase morphologies in assimilation experiments: Implications for disequilibrium melting in the generation of granodiorite rocks. *Mineralogy and Petrology*, 71; 31–49
- 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)
- Chen YJ and Fu SG. 1992. The gold Metallogenic Regularities in the West of Henan Province. Earthquake Publishing House, 234 (in Chinese)
- Condie KC. 2005. TTGs and adakites: Are they both slab melts? *Lithosphere*, 79; 33–44
- De Wit MJ and Ransome LGD. 1992. Inversion Tectonics of Cape Fold Belts, Karoo and Cretaceous Basins of Southern Africa; *Proceedings of the Conference on Inversion Tectonics of the Cape Fold Belt*, Cape Town, South Africa. Talor and Francis Publishing House, 3–269
- 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
- Fowler AD and Jensen LS. 1988. Quantitative trace-element modeling of the crystallization history of the Kinojevis and Blake River groups, Abitibi Greenstone Belt. Ontario. *Can. J. Earth Science*, 26; 1356–1367
- Gao S, Zhou L, Ling WL, Liu YS and Zhou DU. 2005. Age and Geochemistry of Volcanic rocks of Angou Group at the Archean-Proterozoic boundary. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 30(3); 259–263 (in Chinese with English abstract)
- Geng YS, Wan YS and Shen QH. 2002. Early Precambrian Basic Volcanism and Crustal Growth in the North China Craton. *Acta Geologica Sinica*, 76 (2); 200–208 (in Chinese with English abstract)
- Gamble JA, Wright IC, Woodhead JD and McCulloch Mt. 1994. Arc and backarc geochemistry in the southern Kermadec arc-Ngatoro Basin and offshore Taupo volcanic zone, in *Volcanism Associated with*

- Extension at Consuming Plate Margins. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, 81: 193–212
- Goldstein SL, O'Buibs RK and Hamilton PJ. 1984. A Sm-Nd study of atmospheric dusts and particles from major river systems. *Earth and Planetary Science Letters*, 70: 221–236
- Goodwin. 1991. Precambrian geology. *Aan Diego, California, Academic Press*, 666
- Hawkesworth CJ, Gallagher K, Hergt JM and McDermott F. 1993. Mantle and slab contributions in arc magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 21: 175–204
- Hawkesworth CJ, Turner SP, McDermott F, Peate DW and Calsteren P. 1997. U-Th isotopes in arc magmas: Implications for element transfer from the subducted crust. *Science*, 276: 551–555
- Hirschmann MM and Stolper EM. 1996. A possible role for garnet pyroxenite in the origin of the "garnet signature" in MORB. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 24(2): 185–208
- Hoffman PF. 1991. Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside-out? *Science*, 252: 1409–1412
- Hollings P and Kerrich R. 2000. An Archean arc basalt-Nb-enriched basalt-adakite association; The 2.7Ga Confederation assemblage of the Birch-Uchi greenstone belt, Superior Province. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139: 208–226
- Hu SX and Lin QL. 1988. *Geology and Metallogeny of the Collision Belt between the South China and North China Plates*. Nanjing: Nanjing University Press (in Chinese)
- Isozaki Y, Maruyama S and Ogata Y. 1990. Accreted oceanic materials in Japan. *Tectonophysics*, 181: 179–205
- Kampunzu AB, Tombale AR, Zhai M, Bagai Z, Majaule TM and Modisi M. 2003. Mayor and trace element geochemistry of Plutonic rocks from Francistown, NE Botswana; Evidence for Neorchaean continental active margin in the Zimbabwe Craton. *Lithosphere, Special Issue Kaapvaal-Slave Cratons*, inpress
- Kerrich R and Wyman DA. 1996. The trace element systematics of igneous rocks in mineral exploration; An overview. In: Wyman DA ed., *Trace element geochemistry of volcanic rocks; Applications for massive sulphide exploration*. Geological Association of Canada, Short Course Notes, 12: 1–50
- Kerrich R and Xie Q. 2002. Compositional recycling structure of an Archean super-plume; Nb-Th-U-LREE systematics of Archean Komatiites and basalts revisited. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 142: 476–484
- Kerrich R, Polat A and Xie Q. 2008. Geochemical systematics of 2.7Ga Kinojevis Group (Abitibi), and Manitouwadge and Winston Lake (Wawa) Fe-rich basalt-rhyolite associations; Backarc rift oceanic crust? *Lithosphere*, 101: 1–23
- Kimura G, Ludden JN, Dsrsrochers JP and Hori R. 1993. A model of ocean-crust accretion for the Superior Province, Canada. *Lithosphere*, 30: 337–355
- Kröner A, William C, Zhang GW, Guo AL and Todt W. 1988. Age and tectonic setting of Late Archean greenstone-gneiss terrain in Henan Province, China, as revealed by single-grain zircon dating. *Geology*, 16: 211–215
- Kusky TM, Bradley DC, Haeussler P and Karl S. 1997. Controls on accretion of flysch and mélange belts at convergent margins; Evidence from the Chugach Bay thrust and iceworm mélange, Chugach Terrane, Alaska. *Tectonics*, 16: 855–878
- Lao ZQ. 1989. The section plane characteristics and division of Dengfeng Group. *Henan: Henan Geology*, 7(3): 20–26 (in Chinese)
- Lao ZQ, Wang SY, Zhang L, Gong YS and Zhou HW. 1996. The evolution of Precambrian tectonic in Songshan Region, Henan-Field Trip Guide T335 of 30th IGC. Beijing: Geological Publishing House
- 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 with English abstract)
- Large RR, Gemmill JB, Paulick H and Huston DL. 2001. The alteration box plot; A simple approach to lithochemistry associated with volcanic hosted massive sulfide deposits. *Economic Geology*, 96: 957–971
- Li SG, Hart SR, Guo AL and Zhang GW. 1987. A whole-rock Sm-Nd age for the Dengfeng Group in central Henan Province and its tectonic implication. *Chinese Science Bulletin*, 32(22): 1728–1731 (in Chinese)
- Li XH. 1996. A discussion on the model and isochron ages of Sm-Nd isotopic systematics; Suitability and limitation. *Scientia Geologica Sinica*, 31(1): 97–104 (in Chinese with English abstract)
- Liang XR, Wei GJ, Li XH and Liu Y. 2003. Precise measurement of ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd and Sm/Nd ratios using multiple-collectors inductively coupled plasma-mass spectrometer (MC-ICPMS). *Geochimica*, 32(1): 91–96 (in Chinese with English abstract)
- Lu SN. 1994. Judgement on the rationality of a Sm-Nd isochron. *Regional Geology of China*, 13(2): 148–159 (in Chinese)
- Lugmair GW and Marti L. 1978. Lunar initial ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd; Differential evolution of the lunar crust and mantle. *Earth Planet Science Letters*, 39: 349–357
- MacLean WH. 1990. Mass change calculations in altered rock series. *Mineralium Deposita*, 25: 44–49
- Maitre L, Walter R, Batman 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, Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Blackwell Scientific. Oxford. GB, 130–171
- Martin H. 1987. Petrogenesis of Archean trondhjemites, tonalities and granodiorites from Eastern Finland; Major and trace element Geochemistry. *Journal of Petrology*, 28: 921–953
- McCulloch and Gamble. 1991. Geochemical and geodynamical constrains on subduction zone magmatism. *Earth Planet science letters*, 102: 358–374
- McLennan SM and Hemming S. 1992. Samarium/neodymium element and isotopic systematics in sedimentary rocks. *Geochim. Cosmochun. Acta*, 56: 887–898
- Miller KG, Curry WB and Ostermann DR. 1985. Oligocene glacio-eustasy and erosion on the margins of the North Atlantic. *Geology*, 13: 1–13
- Miyashiro A. 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margin. *American J. Science*, 274: 321–355
- Pearce JA and Cann JR. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2): 290–300
- Pearce JA. 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth CJ and Norry MJ (eds.), *Continental basalts and mantle xenoliths*. Shiva, Nantwich, 230–249
- Pearce JA, Barker PF, Edwards SJ, Parkinson IJ and Leat PT. 2000. Geochemistry and tectonic significance of peridotites from the South Sandwich arc-basin system, South Atlantic. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139: 36–53
- Pearce JA and Peate DW. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 23: 251–285
- Perfit MR, Gust DA, Bence AE, Arculus RJ and Taylor S. 1980. Chemical characteristics of island-arc basalts; Implications for mantle sources. *Chemical Geology*, 30: 227–256
- Peucat JJ, Vudal P and Bernard-Griffiths J. 1988. Sr, Nd and Pb isotope systematics in the Archean low-to high-grade transition zone of south India: Syn-accretion vs post-accretion granulites. *Journal of Geology*, 97: 537–550
- Plank T. 2005. Constraints from Thorium/Lanthanum on sediment recycling at Subduction zones and the Evolution of the Continents. *Journal of Petrology*, 46: 921–944
- Polat A, Casey JF and Kerrich R. 1996. Geochemical characteristics of accreted material beneath the Pozanti-Karsaniti ophiolite, Turkey; Intra-oceanic detachment, assembly and obduction. *Tectonophysics*, 263: 249–276
- Polat A, Kerrich R and Wyman DA. 1998. The late Archean Schreiber-Hemlo and White River-Dayohessarah greenstonebelts, Superior

- Province: Collages of oceanic plateaus, oceanic arcs, and subduction accretion complexes. *Tectonophysics*, 289: 295–326
- Polat A, Kerrich R and Wyman DA. 1999. Geochemical diversity in oceanic komatiites and basalts from the late Archean Wawa greenstone belt, Superior Province, Canada: Trace element and Nd isotope evidence for a heterogeneous mantle. *Precambrian Research*, 94: 139–173
- Polat A and Kerrich R. 2000. Archean greenstone belt volcanism and the continental growth-mantle evolution connection: Constraints from Th-U-Nb-LREE systematics of the 2.7Ga Wawa subprovince, Superior Province, Canada. *Earth and Planetary Science Letters*, 175: 41–54
- Polat A and Kerrich R. 2001. Magnesian andesites, Nb-enriched basalt-andesites, and adakites from late Archean 2.7Ga Wawa greenstone belts, Superior Province, Canada: Implications for late Archean subduction zone petrogenetic processes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141: 36–52
- Polat A and Kerrich R. 2006. Reading the geochemical fingerprints of Archean hot subduction volcanic rocks: Evidence for accretion and crustal recycling in a mobile tectonic regime. In: Benn, K., Mareschal, J. D., Condie, K. C. (Eds.), *Archean Geodynamics and Environments. Geophysics Monograph Series*, 164: 189–213
- Rudnick RL and Gao S. 2004. Composition of the continental crust. In: Rudnick, R. L. (Ed.), *The Crust. Treatise on Geochemistry*, vol. 3. Elsevier, Amsterdam, 1–64
- Ryerson SJ and Watson EB. 1987. Rutile saturation in magmas: Implications for Ti-Nb-Ta depletion in island-arc basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 225–239
- Shen BF and Luo H. 1994. The metallogenic characteristics of gold deposits of the Archean greenstone belts in North China Platform. *Journal Geology and Mineral Research North China*, 87–96 (in Chinese with English abstract)
- Simonen A. 1953. Stratigraphy and sedimentation of the Svecofenidic, Early Archean supracrustal rocks in south-western Finland. *Bull. Comm. Geol. Finl*, 160: 64
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: Implications for mantle composition and processes. *Geol Soc London Spec Publ*, 42: 313–345
- Sun S, Zhang GW and Chen ZM. 1985. The Precambrian geology evolution in the south of fault block region, North of China. Beijing: Metallurgical Industry Press
- Taira A. 1992. Accretion of Japanese island arcs and implications for the origin of Archean greenstone belts. *Tectonics*, 11: 1224–1244
- Taylor B and Martinez F. 2003. Back-arc basin basalt systematic. *Earth and Planetary Science Letters*, 210: 481–479
- Wan GQ and Liu DL. 2000. Geochemical compositions of flych graywackes and plate tectonics. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 20(3): 105–112 (in Chinese)
- Wan YS and Wu CY. 1997. REE geochemistry and origins of basaltic rocks-application and problem. In: Zhang BX *et al.* eds. *Modern methods of lithosphere researches*. Beijing: Earthquake Publishing House, 215–228 (in Chinese)
- Wan YS, Liu DY, Wang SY, Zhao X, Zhou HY, Yang CX and Gao LZ. 2006. The early Precambrian tectonic magmatic thermal events-evidence from SHRIMP Zircon U-Pb Chronology. *Abstract Book of Annual National Symposium on Petrology and Geodynamics*
- 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)
- Weaver BL. 1991. The origin of ocean island basalt end-member compositions: Trace element and isotopic constrains. *Earth and Planetary Science Letter*, 104: 381–397
- Whitford DJ, Korsch MJ, Porritt PM and Craven SJ. 1988. Rare earth element mobility around the volcanogenic polymetallic massive sulfide deposit at Que River, Tasmania, Australia. *Chemical Geology*, 68: 105–119
- Windley BF. 1977. *The evolution continents*. New York: John Wiley & Sons, 385
- Winchester JA and Floyd PA. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325–343
- Woodhead JD, Eggins S and Gamble JA. 1993. High field strength and transition element systematics in island arc and backarc basin basalts: Evidence for multi-stage melt extraction and ultra-depleted mantle wedge. *Earth and Planetary Science Letters*, 114: 491–504
- Wu JS, Geng YS, Shen QH, Wan YS, Liu DY and Song B. 1998. *Archean Geology Characteristics and Tectonic Evolution of China-Korea Paleocoastline*. Beijing: Geological Publishing House, 160–184 (in Chinese)
- Wyman DA. 2003. Upper mantle processes beneath the 2.7Ga Abitibi belt, Canada: A trace element perspective *Precambrian Research*, 127: 143–165
- Wyman DA and Holling P. 2006. Late Archean convergent margin volcanism in the Superior Province: A comparison of the Blake River Group and Contederation Assemblage. *American Geophysical Union Monograph Geodynamics and Environments*, Benn K, Mareschal JC and Condie K. (eds.), 164: 215–238
- Xue LW, Yuan ZL, Zhao TP and Tao ZQ. 2005. Geochemistry and geochronology of metamorphic medium-basic volcanic rocks of Dengfeng Group in Jishan, Henna Province. *Geochimica*, 34(1): 57–65 (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
- Zhang GW, Bai YB, Sun Y, Guo AL, Zhou DW and Li TH. 1985. Meta-morphism of basement rocks in the central zone of the North China Craton: Implications for paleoproterozoic tectonic evolution. *Precambrian Research*, 103: 55–88
- Zhang Q, Wang Y, Xong XL and Li CD. 2008. Adakite and Granite: Challenge and Opportunity (the 12 chapter of the second article). China Land Press, 179–190 (in Chinese)
- Zhou YY, Zhao TP, Xue LW, Wang SY and Gao JF. 2009. Petrological, geochemical and chronological constrains for the origin and geological significance of Neorarchean TTG gneiss in the Songshua area, North China Craton. *Acta Petrologica Ainica*, 25(2): 331–347 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 白瑾, 黄学光, 戴风岩, 吴昌华. 1993. 中国前寒武纪地壳演化. 北京: 地质出版社, 199–203
- 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
- 陈衍景, 富士谷. 1992. 豫西金矿成矿规律. 北京: 地震出版社, 234
- 高山, 周炼, 凌文黎, 刘勇胜, 周鼎武. 2005. 华北克拉通南缘太古-元古宙界线安沟群火山岩的年龄及地球化学. *地球科学-中国地质大学学报*, 30(3): 259–263
- 耿元生, 万渝生, 沈其韩. 2002. 华北克拉通早前寒武纪基性火山作用与地壳增生. *地质学报*, 76(2): 199–208
- 胡受奚, 林潜龙. 1988. 华北华南古板块拼合带地质和成矿. 南京: 南京大学出版社, 558
- 劳子强. 1989. 登封群剖面特征及其划分. *河南地质*, 7(3): 20–26

- 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及演化. 见罗铭玖: 河南地质矿产与环境文集, 中国环境科学出版社
- 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
- 李曙光, Hart SR, 郭安林, 张国伟. 1987. 河南中部登封群 Sm-Nd 同位素年龄及其构造意义. 科学通报, 32(22): 1728-1731
- 李献华. 1996. Sm-Nd 模式年龄和等时线年龄的适用性与局限性. 地质科学, 31(1): 97-104
- 梁细荣, 韦刚建, 李献华, 刘颖. 2003. 利用 MC-ICPMS 精确测定¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 和 Sm/Nd 比值. 地球化学, 32(1): 91-96
- 陆松年. 1994. Sm-Nd 等时线年龄合理性的判别. 中国区域地质, 13(2): 148-159
- 沈保丰, 骆辉. 1994. 华北陆台太古宙绿岩带金矿的成矿特征. 华北地质矿产, 9(1): 87-96
- 孙枢, 张国伟, 陈志明. 1985. 华北断块区南部前寒武纪地质演化. 北京: 冶金工业出版社
- 万国庆, 刘德良. 2000. 复理石杂砂岩的化学组成与板块构造. 沉积与特提斯地质, 20(3): 105-112
- 万渝生, 吴澄宇. 1997. 稀土元素地球化学与玄武质岩石成因-应用与问题. 见: 张炳熹等主编. 岩石圈研究的现代方法, 北京: 原子能出版社, 215-228
- 万渝生, 刘敦一, 王世炎, 赵逊, 周红英, 杨长秀, 高林志. 2006. 河南嵩山地区早前寒武纪构造岩浆热事件-锆石 SHRIMP 年代学证据. 全国岩石学与地球动力学研讨会论文摘要集
- 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. 中国地质科学院院报, (16): 215-234
- 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
- 薛良伟, 原振雷, 赵太平, 陶自强. 2005. 河南箕山登封岩群变质中基性火山岩的地球化学及年代学研究. 地球化学, 34(1): 57-65
- 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
- 张旗, 王焰, 熊小林, 李承东. 2008. 埃达克岩和花岗岩: 挑战与机遇(第二篇第12章). 中国大地出版社, 179-190
- 周艳艳, 赵太平, 薛良伟, 王世炎, 高剑锋. 2009. 河南嵩山地区新太古代 TTG 质片麻岩的成因及其地质意: 来自岩石学、地球化学及同位素年代学的制约. 岩石学报, 25(2): 331-347