

鹤壁新生代玄武岩源区及成因:地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素证据^{*}

朱昱升^{1,2} 侯广顺³ 杨进辉^{1**}

ZHU YuSheng^{1,2}, HOU GuangShun³ and YANG JinHui^{1**}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 河南理工大学资源环境学院, 焦作 454000

1. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

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

3. Institute of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China

2012-03-16 收稿, 2012-09-14 改回.

Zhu YS, Hou GS and Yang JH. 2012. Sources and petrogenesis of the Cenozoic alkali basalts in Hebi, eastern North China Craton: Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 4064–4076

Abstract Continental alkali basalts are the key to understand the nature of the subcontinental lithospheric mantle and the interaction among the crust, lithospheric mantle and asthenosphere. Cenozoic alkali basalts, located in the central North China Craton, are main components of Cenozoic basalt province in the North China Craton. Their source and petrogenesis would provide complement evidence for studying the modification of lithospheric mantle beneath the central North China Craton during Cenozoic. The Hebi basalts are basanites and alkali olivine basalts, belonging to alkaline rocks, with SiO₂ contents of 45.0% ~ 47.8%, MgO concentrations of 7.3% ~ 8.5%, and Na₂O + K₂O abundances of 4.6% ~ 6.3%. They are enriched in light rare earth elements (REEs) with highly fractionated LREEs and HREEs ((La/Yb)_N = 15.1 ~ 21.2). In primitive mantle-normalized spidergrams, all rocks have evident positive Nb and Ta anomalies without Eu anomalies. They are enriched in LILEs and HFSEs, with Nb/U ratios of 35 ~ 48, La/Nb ratios of 0.4 ~ 0.7, and Ba/Nb ratios of 3.6 ~ 11. They have depleted Sr-Nd-Hf isotopic compositions, with initial ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios of 0.7036 ~ 0.7044, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ values of +0.4 to +5.4 and $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of +5.0 to +9.7. All these characteristics are similar to those of the oceanic island basalts (OIBs). All these geochemical features, combined with petrographic observations, suggest weak crustal contamination and fractional crystallization in their origin. It is concluded that the Hebi alkali basalts were derived from small degree partial melting of asthenospheric mantle at depths more than 80km, with interaction with lithospheric mantle.

Key words Alkali basalt; Geochemistry; Mantle; Lithosphere-asthenosphere interaction; Hebi region in the North China Craton

摘 要 大陆碱性玄武岩是研究大陆地幔、软流圈和岩石圈、壳幔相互作用的窗口。鹤壁碱性玄武岩为华北中部新生代玄武岩重要组成部分,其源区和成因对了解新生代期间华北克拉通中部岩石圈地幔改造提供了重要依据。鹤壁新生代玄武岩主要为碱性玄武岩,贫硅(SiO₂ = 45.0% ~ 47.8%)富镁(MgO = 7.3% ~ 8.5%)和全碱(Na₂O + K₂O = 4.6% ~ 6.3%),富集轻稀土元素,轻、重稀土元素强烈分馏[(La/Yb)_N = 15.1 ~ 21.2],无明显Eu异常。富集大离子亲石元素(LILEs)和高场强元素(HFSEs)。在原始地幔标准化蛛网图上,具有明显的Nb、Ta正异常,其中Nb/U = 35 ~ 48、La/Nb = 0.4 ~ 0.7、Ba/Nb = 3.6 ~ 11。全岩的Sr、Nd、Hf同位素比值分别为⁸⁷Sr/⁸⁶Sr_i = 0.7036 ~ 0.7044, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = +0.4 \sim +5.4$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = +5.0 \sim +9.7$,显示鹤壁新生代玄武岩具有洋岛玄武岩(OIB)的地球化学特征和同位素组成。岩相学特征和地球化学特征表明鹤壁新生代玄武岩是软流圈地幔(>80km)小程度部分熔融形成的熔体与富集的岩石圈地幔相互作用后的结果,地壳物质混染和结晶分离作用不显著。

关键词 碱性玄武岩;地球化学;地幔;岩石圈-软流圈相互作用;华北鹤壁

中图法分类号 P581;P588.145

* 本文受国家自然科学基金杰出青年基金(40925007)资助。

第一作者简介:朱昱升,男,1990年生,硕士生,岩石学专业,E-mail: zhuyusheng.igg@gmail.com

** 通讯作者:杨进辉,男,1971年生,研究员,博士生导师,岩石学与地球化学专业,E-mail: jinhui@mail.iggcas.ac.cn

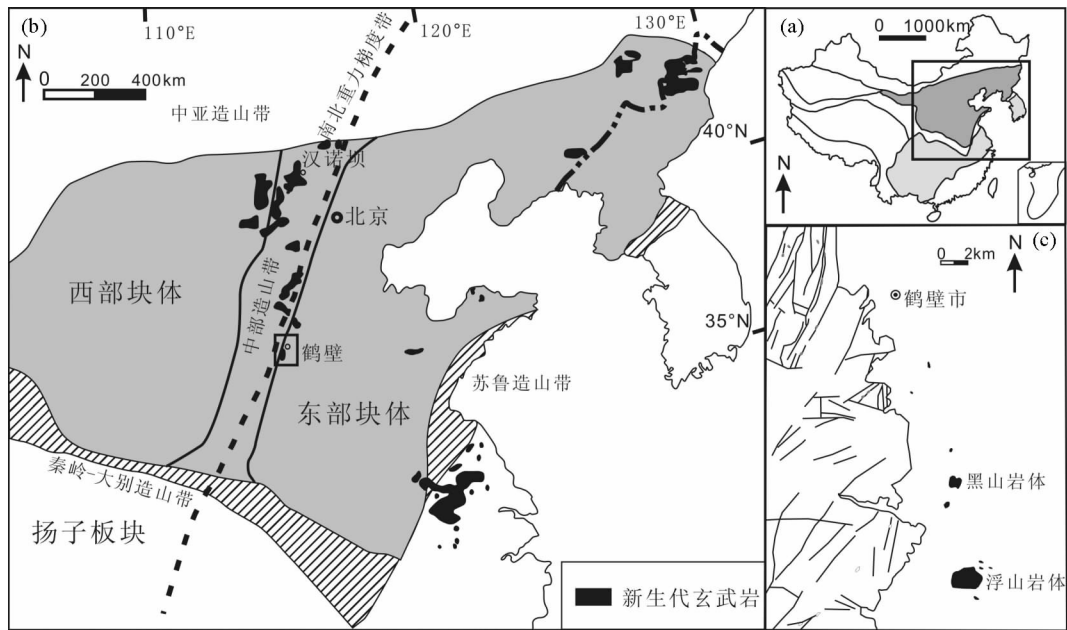


图1 华北克拉通位置图(a)、华北克拉通构造简图(b, 据 Yang *et al.*, 2010 修改)和鹤壁新生代玄武岩和主要裂谷系分布图(c)

Fig. 1 Location of the North China Craton (a), schematic geological map of the North China Craton (b, modified after Yang *et al.*, 2010) and distribution of the Cenozoic basalts and major rifts in Hebi

1 引言

玄武岩来源于地幔,其化学成分和同位素组成既可以反映复杂的岩浆演化过程,也可反映源地地幔组成的多样性,是人类认识地球深部的重要窗口。大洋玄武岩因其受地壳改造作用小,成分上更接近原始岩浆,因而很早就受到岩石学家和地球化学家的关注(Zindler and Hart, 1986; Sun and McDonough, 1989; Hofmann, 1997),成为研究大洋地幔的主要途径。与大洋玄武岩相比,大陆玄武岩成分复杂,巨厚的大陆岩石圈(40~200km)使其原始岩浆很容易受到改造而失去某些地幔源区的信息。大陆碱性玄武岩是大陆玄武岩中比较特殊的岩石类型,该类岩石通常产生于板内拉张或裂谷环境,母岩浆成分贫 SiO_2 ,富含挥发组分,在岩石圈中的岩浆上升、运移速度快,遭受围岩混染相对较小,其成分特征可接近于原始岩浆成分,加之其常捕掳大量地幔岩石和地壳岩石包体,因而成为研究大陆岩石圈及其下部地幔的主要对象(Farmer, 2003)。同时,大陆碱性玄武岩较小的岩浆规模及火山岩的不易保留性也使得对已发现岩石的研究意义变的更加重要。

华北克拉通东部自显生宙以来遭受了强烈的去克拉通化作用,岩石圈地幔的性质发生了巨大改变(Menzies *et al.*, 1993; Griffin *et al.*, 1998; Fan *et al.*, 2000; Yang *et al.*, 2008)。华北东部广泛发育的中、新生代板内玄武岩浆作用为研究该地区的岩石圈地幔性质和演化提供了天然的地质

样品。过去几十年,国内外的学者对此开展了大量的研究,提出了不同成因模型和地幔源区(Liu *et al.*, 1983; Fan and Hooper, 1991; Liu *et al.*, 1994; Chung, 1999; Zhang *et al.*, 2002; Tang *et al.*, 2006; 徐义刚, 2006; 汤艳杰等, 2006; Xu, 2007; Ho *et al.*, 2011; Yarmolyuk *et al.*, 2011)。相对于东部地区,位于太行山东侧的鹤壁地区新生代玄武岩的研究甚少,缺乏系统的地球化学及岩石成因研究,已有的研究多集中在地幔橄榄岩包体上(Zheng *et al.*, 2001, 2007; 赵新苗等, 2007; 樊棋诚和隋建立, 2009; Liu *et al.*, 2011; Tang *et al.*, 2011, 2012; Sun *et al.*, 2012)。本文拟通过研究鹤壁玄武岩的地球化学特征来探讨其岩石成因及该地区新生代地幔源区特征,并对该地区新生代玄武岩的形成机制给出可能的解释。

2 地质背景与岩石学特征

华北克拉通是世界上古老克拉通之一(Jahn *et al.*, 1987; Liu *et al.*, 1992),也是我国东部最为重要的地质构造单元(图1a)。它由东西部陆块在~1.85Ga时碰撞拼合、克拉通化而形成(Zhao *et al.*, 2001)(图1b),但自显生宙,尤其是中生代以来发生了去克拉通化(Yang *et al.*, 2008, 2010a),并伴随着强烈的岩浆活动、构造变形、成矿作用和盆地形成。新生代以来,华北东部岩浆作用以玄武质为主,岩石类型主要为碱性玄武岩和橄榄拉斑玄武岩,与分布在中国东北、东部沿海地区共同组成中国东部新生代玄武岩分布区

(Zhou and Armstrong, 1982; 刘若新, 1992; Zou *et al.*, 2000)。太行山位于南北重力梯度带中段, 中生代以来发育有近 NNE 向的断裂带 (Ye *et al.*, 1987; Gilder *et al.*, 1991), 沿断裂带广泛分布新生代玄武岩。研究区位于太行山东南缘的河南鹤壁, 区内新生代玄武岩含有大量地幔橄榄岩捕虏体 (樊祺诚和刘若新, 1994; Zheng *et al.*, 2001; 赵新苗等, 2007), 研究发现该地区橄榄岩可分为高 Mg ($Fo \geq 92$) 橄榄岩和低 Mg ($Fo < 91$) 橄榄岩, 高 Mg 橄榄岩以粗粒碎斑状方辉橄榄岩和贫单斜辉石的二辉橄榄岩为主, 类似于华北古生代金伯利岩中的地幔捕虏体, 全岩和硫化物单颗粒 Re-Os 同位素定年结果为 2.3 ~ 3.4 Ga (Zheng *et al.*, 2007; Sun *et al.*, 2012), 代表着太古代克拉通地幔残余; 低 Mg 橄榄岩具有高 $Al_2O_3 + CaO$ 和低 Mg/Si 值, 类似于华北其它地区新生代地幔捕虏体, 但其 Re-Os 定年结果同样给出太古代的模式年龄, 该类型的地幔很有可能是古老地幔经后期熔体改造作用的产物 (Zheng *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2011; Tang *et al.*, 2012; Sun *et al.*, 2012) 此类捕虏体所占比例较少。

本文样品采集于鹤壁市以南 ~ 15 km 处的浮山岩体 (FS01-FS05, 10JH01-10JH04) 和黑山岩体 (10JH05-10JH08) (图 1c), 为该地区最大的两个岩体, 浮山岩体约 3 km^2 , 黑山岩体约 0.5 km^2 。岩体受 NNE 向断裂控制, 整体为层状产出, 覆盖在上第三系鹤壁组之上或侵入之中, 被盖在第四系下更新统砾岩之下, 喷发年龄为 4.0 ~ 4.3 Ma (全岩 K-Ar 年龄; 刘若新等, 1992), 应为同期岩浆作用, 岩体在深部相连。岩石类型较为单一, 主要为橄榄玄武岩, 次为玄武质火山碎屑岩。橄榄玄武岩深灰-黑色, 致密坚硬, 具块状构造和气孔-杏仁构造 (图 2a)。斑状结构, 斑晶包括橄榄石、辉石。橄榄石斑晶粒径平均为 $300 \mu\text{m}$, 呈自形-半自形, 短柱状或不规则颗粒状, 可见两端尖锐的六边形晶形, 未解理但不规则裂纹发育, 正高突起, 糙面较明显, 橄榄石斑晶大多伊丁石化 (图 2b, e), 说明玄武岩遭受了表生氧化作用, 部分见溶蚀结构 (图 2e), 除此之外未发现其它后期改造特征; 辉石斑晶主要为单斜辉石, 自形-半自形, 干涉色最高达 II 级蓝绿 (图 2c)。基质为针状斜长石微晶构成格架状, 其间充填有细小的辉石和橄榄石、磁铁矿以及火山玻璃, 构成间粒-间隐结构。

3 分析方法

对野外采集的样品进行岩相观察后, 挑选出 11 件新鲜样品进行全岩地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素分析, 所有分析测试都在中国科学院地质与地球物理研究所完成。全岩主量元素采用 X 荧光光谱 (XRF) 玻璃熔片分析法, 分析精度为 1% (含量 > 10%) 和 5% (含量 < 1.0%)。全岩微量元素分析在多接收等离子体质谱实验室完成, 样品的制备采用混合酸溶样法。首先, 准确称取岩石样品粉末 50 mg 于 Teflon 有盖溶样弹中, 加入 1.5 mL 高纯 HNO_3 , 1.5 mL 高纯 HF 和 0.01 mL 高纯 $HClO_4$ 。然后置于 140°C 的电热板上开盖并加

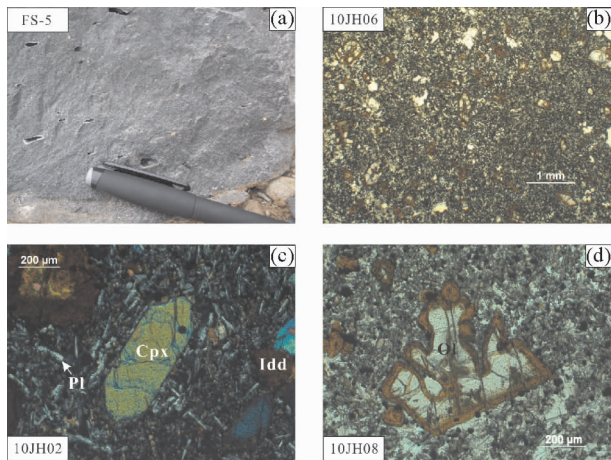


图 2 鹤壁玄武岩野外照片 (a) 和显微照片 (b-d) (b) 和 (d) 为单偏光, (c) 为正交偏光

Fig. 2 Microphotographs of the Cenozoic basalts in Hebi

热蒸干, 再次加入 1.5 mL 高纯 HNO_3 , 1.5 mL 高纯 HF, 加盖装入钢套。将拧紧钢套并置于 195°C 烘箱中加热 48 h。取出再次蒸干后加入 3 mL 高纯 HNO_3 并保持 140°C 蒸干, 以去除残余的 HF。再次加入 3 mL 浓度为 50% 的 HNO_3 , 加盖放入钢套中, 在 150°C 温度下加热 24 h, 以保证样品提取完全。最后将样品倒入 100 mL 的 PET 瓶中, 加入 1 g 铑内标并加水定容至 100 g。样品测试选用 Agilent 7500a 型四极杆电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 进行测定, 分析精度依所测元素的浓度高低而变化于 5% ~ 10% 之间。

全岩的 Sr、Nd 和 Hf 同位素分析在 Thermo Fisher Scientific Neptune MC-ICP-MS 上完成的, 详细测试流程请参见文献 (Yang *et al.*, 2010b; Yang *et al.*, 2011a, b)。准确称取 200 目样品粉末 150 mg 于 Teflon 溶样弹中, 依次加入 2.5 mL HF、0.2 mL HNO_3 和 $HClO_4$, 加钢套后放入 190°C 烘箱

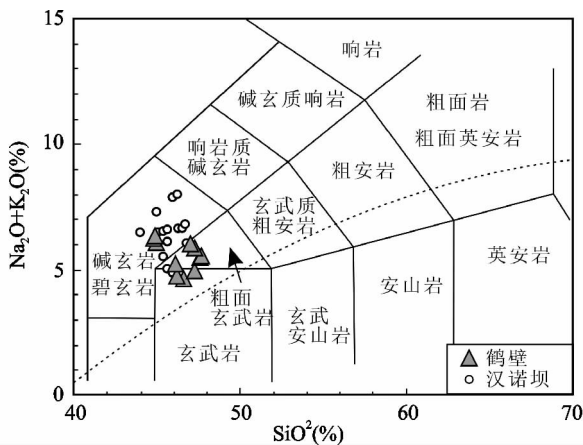


图 3 玄武岩 $Na_2O + K_2O$ - SiO_2 图 (据 Le Maitre, 2002)

虚线为碱性及亚碱性系列分界线, 汉诺坝碱性玄武岩数据引自 Zhi *et al.* (1990); Basu *et al.* (1991)

Fig. 3 Plots of $Na_2O + K_2O$ - SiO_2 (after Le Maitre, 2002)

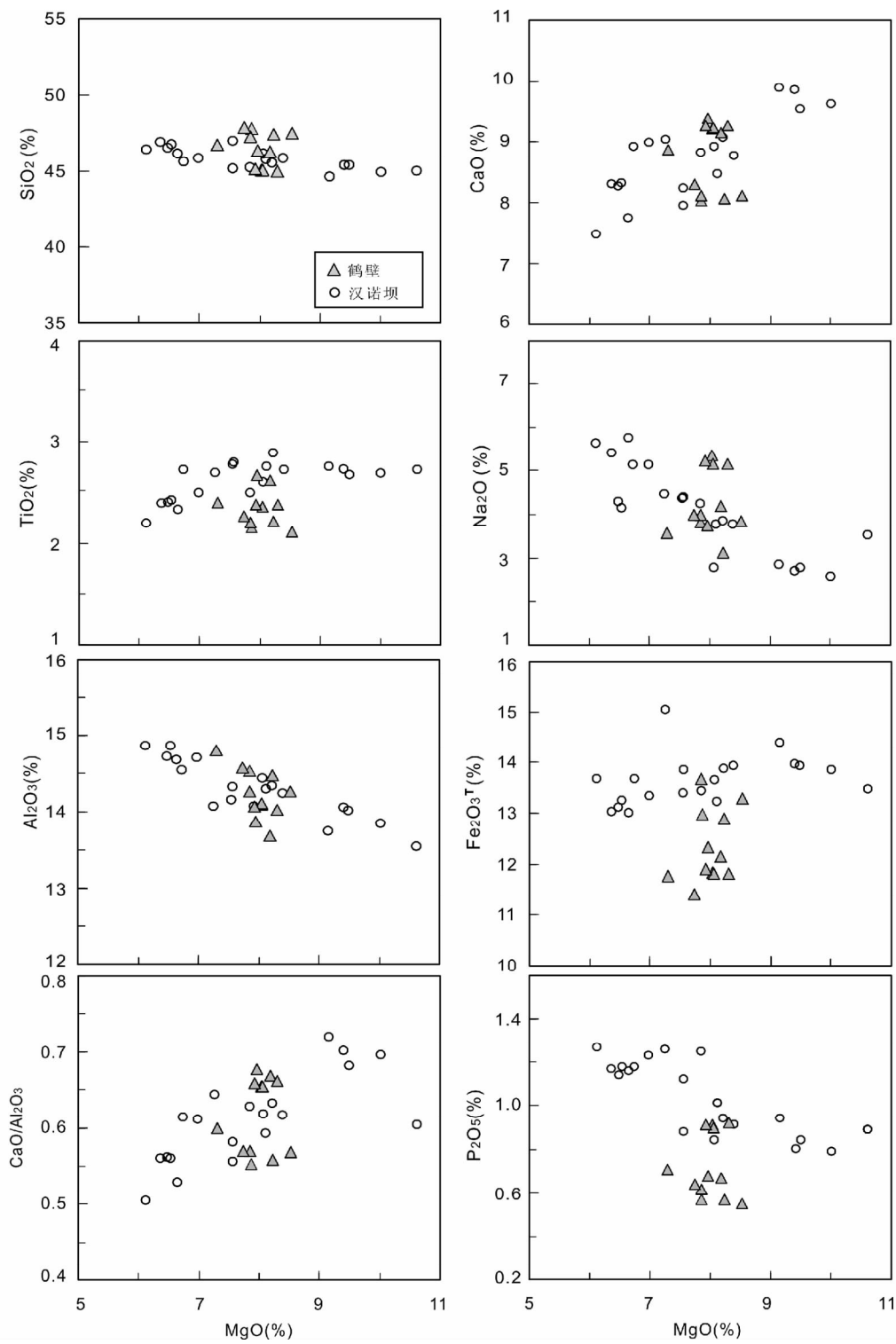


图 4 鹤壁玄武岩氧化物与 MgO 二元相关图

汉诺坝数据来源同图 3

Fig.4 Various oxide plots against MgO for Cenozoic basalts in Hebi

烘烤一周。冷却后的样品置于电热板上蒸干，驱走 HClO₄，然后加入 6M HCL 溶解样品并再次蒸干用以将氟化物全部转换为氯化物，最后用 3M HCl 提取溶解好的样品准备化学

分离。Lu-Hf 的化学分离采用 Eichrom Ln-spec 树脂 (100 ~ 150μm, 2mL)。分别使用 3M 和 4M HCL 对上样后的树脂淋洗基体元素并获取含主量元素和轻、中稀土元素的溶液用于

表 1 鹤壁玄武岩主量元素(wt%)和微量元素含量(×10⁻⁶)
Table 1 Major(wt%) and trace elements(×10⁻⁶) data of basalts from Hebi

样品号	FS-1	FS-2	FS-3	FS-5	10JH001	10JH002	10JH003	10JH004	10JH005	10JH006	10JH007	10JH008
岩体	浮山岩体								黑山岩体			
SiO ₂	47.78	47.44	47.41	47.21	46.36	46.23	46.74	47.84	45.07	45.07	44.95	45.08
TiO ₂	2.15	2.11	2.21	2.2	2.67	2.62	2.4	2.27	2.36	2.36	2.38	2.38
Al ₂ O ₃	14.53	14.26	14.47	14.27	13.86	13.68	14.8	14.57	14.09	14.11	14.02	14.07
Fe ₂ O ₃ ^T	12.98	13.29	12.89	13.68	12.32	12.15	11.77	11.42	11.83	11.81	11.81	11.91
MnO	0.16	0.16	0.15	0.16	0.16	0.16	0.15	0.15	0.17	0.17	0.17	0.17
MgO	7.86	8.53	8.23	7.85	7.96	8.18	7.3	7.74	8.04	8.05	8.3	7.93
CaO	8.03	8.11	8.07	8.12	9.38	9.15	8.86	8.3	9.22	9.24	9.27	9.26
Na ₂ O	3.82	3.85	3.11	3.99	3.73	4.2	3.56	3.99	5.36	5.15	5.17	5.24
K ₂ O	1.59	1.95	1.77	1.97	0.94	0.93	1.02	1.45	0.93	0.87	1	1.01
P ₂ O ₅	0.57	0.55	0.57	0.62	0.68	0.67	0.71	0.64	0.91	0.9	0.92	0.91
LOI	0.06	-0.86	0.56	-0.64	2.12	1.72	2.1	1.06	1.5	1.76	1.52	1.58
Total	99.53	99.39	99.44	99.43	100.18	99.69	99.41	99.43	99.48	99.49	99.51	99.54
Mg [#]	54.8	56.2	56.1	53.4	56.4	57.4	55.4	57.5	57.6	57.7	58.4	57.1
Cr	275	276	286	283	317	330	307	309	285	283	287	289
Co	49.2	47.3	52.2	48.5	59.5	60.6	51.0	52.8	53.0	52.9	53.8	55.3
Ni	210	212	217	196	245	244	202	215	187	188	188	189
Rb	13.6	19.0	15.5	18.9	5.9	15.0	8.3	20.5	21.6	22.3	22.0	20.9
Sr	709	711	721	780	865	843	933	879	1030	1056	1057	1032
Y	20.0	19.1	21.0	19.6	22.1	22.0	22.1	21.1	25.2	25.3	25.5	25.6
Zr	186	186	188	199	216	218	195	189	297	298	297	299
Nb	50.1	50.3	50.1	54.5	48.7	71.1	56.9	55.3	111.8	114.3	113.3	107.1
Cs	0.33	0.42	0.25	0.37	0.62	0.44	0.42	0.37	0.40	0.39	0.47	0.39
Ba	426	439	570	472	537	504	515	479	405	430	434	406
La	29.9	31.3	32.6	34.8	36.1	35.0	38.0	35.8	44.3	44.6	44.8	44.5
Ce	61.5	64.1	61.5	70.1	67.4	65.7	70.1	67.2	81.7	81.8	82.3	82.6
Pr	7.40	7.63	7.79	8.31	7.89	7.68	8.16	7.87	9.41	9.48	9.49	9.48
Nd	29.4	29.8	30.2	31.2	32.5	31.7	33.1	32.0	38.3	38.8	38.9	38.7
Sm	6.11	6.04	6.21	6.36	7.29	7.13	7.16	6.84	8.38	8.39	8.37	8.47
Eu	2.09	2.06	2.13	2.15	2.34	2.31	2.35	2.24	2.63	2.65	2.66	2.65
Gd	5.59	5.49	5.70	5.73	6.24	6.15	6.12	5.91	6.94	6.96	6.98	6.94
Tb	0.78	0.76	0.79	0.79	0.88	0.86	0.85	0.81	0.99	1.01	1.01	1.01
Dy	4.91	4.77	4.89	4.75	4.56	4.47	4.47	4.23	5.17	5.14	5.15	5.18
Ho	0.77	0.74	0.77	0.75	0.85	0.83	0.84	0.80	0.93	0.94	0.94	0.95
Er	1.73	1.67	1.72	1.68	1.90	1.87	1.92	1.83	2.14	2.15	2.14	2.17
Tm	0.26	0.24	0.25	0.24	0.25	0.24	0.26	0.24	0.28	0.28	0.28	0.28
Yb	1.42	1.34	1.37	1.31	1.33	1.31	1.39	1.34	1.52	1.51	1.50	1.55
Lu	0.21	0.19	0.20	0.19	0.19	0.19	0.20	0.19	0.21	0.22	0.22	0.22
Hf	3.6	3.6	3.6	3.8	4.6	4.5	4.0	3.9	6.2	6.2	6.1	6.2
Ta	3.3	3.3	3.2	3.5	3.3	4.5	3.7	3.5	8.7	8.8	8.9	8.7
Pb	7.5	7.6	4.9	6.5	5.1	4.7	6.2	5.2	5.1	5.2	5.1	5.1
Th	4.0	4.3	4.0	4.8	5.0	4.7	5.4	5.1	6.7	6.7	6.6	6.7
U	1.3	1.3	1.2	1.5	1.5	1.4	1.6	1.5	2.4	2.4	2.4	2.4
ΣREE	152	156	156	168	170	165	175	167	203	204	205	205
La/Nb	0.6	0.6	0.7	0.6	0.7	0.5	0.7	0.6	0.4	0.4	0.4	0.4
Ba/Nb	8.5	8.7	11.4	8.7	11.0	7.1	9.1	8.7	3.6	3.8	3.8	3.8
Nb/U	38	38	43	36	32	50	35	36	46	47	48	44

注: Mg[#] = 100 × molar Mg/(Mg + Fe)

下一步分离。然后加注 6M HCl 淋滤残余的 Lu 和 Yb,以保证提取 Hf 的纯度。基体元素 Ti 与 Hf 的分离通过 4N HCl + 0.5% H₂O₂ 实现。最后用 2M HF 淋洗 Hf,用于 MC-ICP-MS 分析。该方法在(Münker *et al.*, 2001) 的基础上改进而建立。Rb-Sr 化学分离使用标准阳离子交换树脂,得到的 Sr 再经 Sr 特效树脂纯化后进行质谱分析(Balcaen *et al.*, 2005)。用 6M HCl 淋洗得到轻、中稀土,加注到 Eichrom Ln 树脂(100 ~ 150μm, 2mL) 上,分别用 0.25M HCl 和 0.4M HCl 淋洗得到 Sm 和 Nd。整个流程的空白含量为 Sr < 100pg, Nd < 50pg, Hf < 50pg。Sr-Nd-Hf 同位素的分馏分别采用⁸⁶Sr/⁸⁸Sr =

0.1194, $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 和 $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.7325$ 进行校正, 采用指数法。测试过程中, Sr 同位素标准样品 NBS987 的测定结果为 0.710249 ± 12 (2SD, $n = 15$), Nd 同位素标准样品 JNdi-1 的测定结果为 0.512115 ± 12 (2SD, $n = 15$), Hf 同位素标准样品 Alfa Hf 14374 的测定结果为 0.282185 ± 10 (2SD, $n = 15$)。

4 分析结果

4.1 主量元素特征

鹤壁玄武岩全岩主量和微量元素分析结果见表 1。在 TAS 图上 (图 3), 样品分布于碱性玄武岩区域且为钠质 ($\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$), 经 CIPW 标准矿物计算得出岩石均含有霞石和橄榄石而无石英和紫苏辉石。因此, 该区新生代玄武岩主要为碧玄岩和碱性橄榄玄武岩。相对于碱性橄榄玄武岩的 SiO_2 (46.2% ~ 47.8%), Na_2O (3.1% ~ 4.2%), CaO (8.0% ~ 9.4%), P_2O_5 (0.6% ~ 0.7%), 碧玄岩的 SiO_2 (44.9% ~ 45.1%) 更低而 Na_2O (5.2% ~ 5.4%)、 CaO (9.2% ~ 9.3%)、 P_2O_5 (0.9%) 的含量更高。与冀北汉诺坝碱性玄武岩相比, 该地区样品的 MgO 变化范围较小, 除 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 和 P_2O_5 含量明显偏小外, 其他氧化物的含量分布与汉诺坝岩石相似 (图 4)。同时, 该区样品内部 SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 和 MgO 之间并未显示出相关性。

4.2 微量元素特征

鹤壁新生代碱性玄武岩稀土总量变化范围为 152×10^{-6} ~ 205×10^{-6} , 明显富集轻稀土元素。在球粒陨石标准化分配模式图上 (图 5), 呈现右倾曲线, 轻、重稀土元素强烈分馏, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 15.1 \sim 21.4$, $(\text{Dy}/\text{Yb})_{\text{N}} = 2.1 \sim 2.4$, 无 Eu 和 Ce 的负异常。原始地幔标准化蛛网图中, 大离子亲石元素 (LILE; 如 Rb、Ba、Th、U、Sr) 和高场强元素 (HFSE; 如 Zr、Hf、Ti) 富集, 具有明显的 Nb、Ta 和 Sr 正异常、Hf 弱负异常。不相容元素比值 $\text{Nb}/\text{U} = 32.0 \sim 49.8$, $\text{La}/\text{Nb} = 0.4 \sim 0.7$, $\text{Ba}/\text{Nb} = 3.6 \sim 11$ 。鹤壁玄武岩的微量元素特征和洋岛玄武岩 (OIB) 的特征相似, 暗示二者可能来源于相同的地幔源区。进一步分析可得出, 样品中的碧玄岩相对于碱性橄榄玄武岩更为富集 LILE 和 HFSE, 其 Nb/U 更高而 La/Nb 、 Ba/Nb 更低 (表 1), 成分上与 OIB 更为相近。岩浆中的橄榄石是 Ni、Cr 的主要赋存矿物, 其经历分离结晶作用后会使得这些元素表现出和 MgO 正相关性, 如汉诺坝碱性玄武岩; 鹤壁碱性玄武岩并未表现出这种相关性, 且具有较高的 Ni、Cr 含量 (图 6)。

4.3 全岩 Sr-Nd-Hf 特征

全岩 Sr-Nd-Hf 同位素分析结果见表 2。样品同位素比值的变化范围相对较小, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i = 0.7036 \sim 0.7044$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = +0.4 \sim +5.4$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = +5.0 \sim +9.7$ 。岩石同位素二元

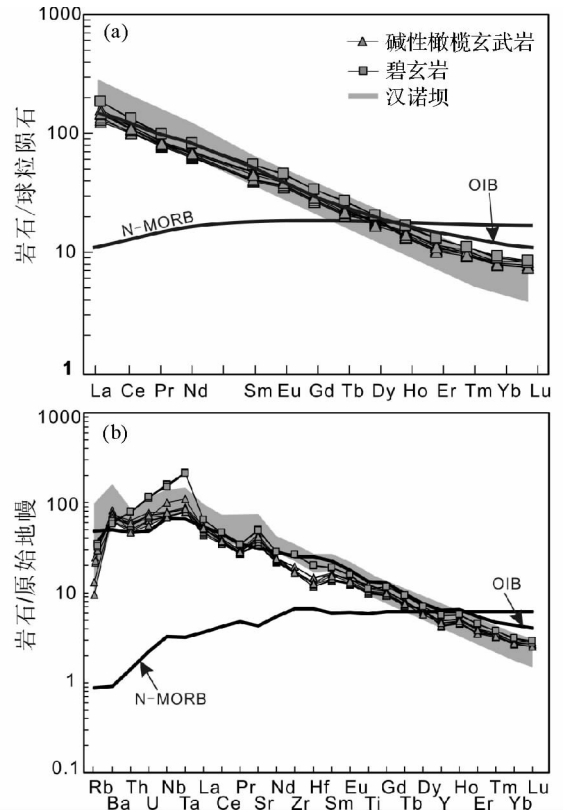


图 5 稀土元素球粒陨石标准化分配图 (a) 和不相容元素原始地幔标准化图 (b) (球粒陨石及原始地幔标准化数值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized trace element diagrams (b) (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

相关图中 (图 7), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ 与 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 负相关, 位于 OIB 所在的亏损地幔象限内且靠近原始地幔值; $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 与 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 成正相关, 同样位于 OIB 所在的区域内, 并与地幔演化趋势线重合。其中, 碧玄岩的 Sr-Nd-Hf 同位素比值要比碱性橄榄玄武岩更为亏损, 这种差别可能是二者地幔源区性质的不同或者说碧玄岩所代表的岩浆成分较碱性橄榄玄武岩更为原始。总体来说, 鹤壁碱性玄武岩与汉诺坝碱性玄武岩在同位素上有着相似的特征 (Song *et al.*, 1990; Zhi *et al.*, 1990; Basu *et al.*, 1991), 都具有洋岛玄武岩 (OIB) 类似的同位素组成。

5 讨论

大陆玄武岩具有复杂的岩石类型和地球化学组成, 这些特征可能是岩浆源区、熔融程度和地壳混染共同作用的结果 (Farmer, 2003)。因此, 本文将根据鹤壁玄武岩的地球化学特征和 Sr-Nd-Hf 同位素组成, 推测其岩浆源区和成岩过程, 并结合区域地质演化, 讨论其形成的可能地球动力学背景。

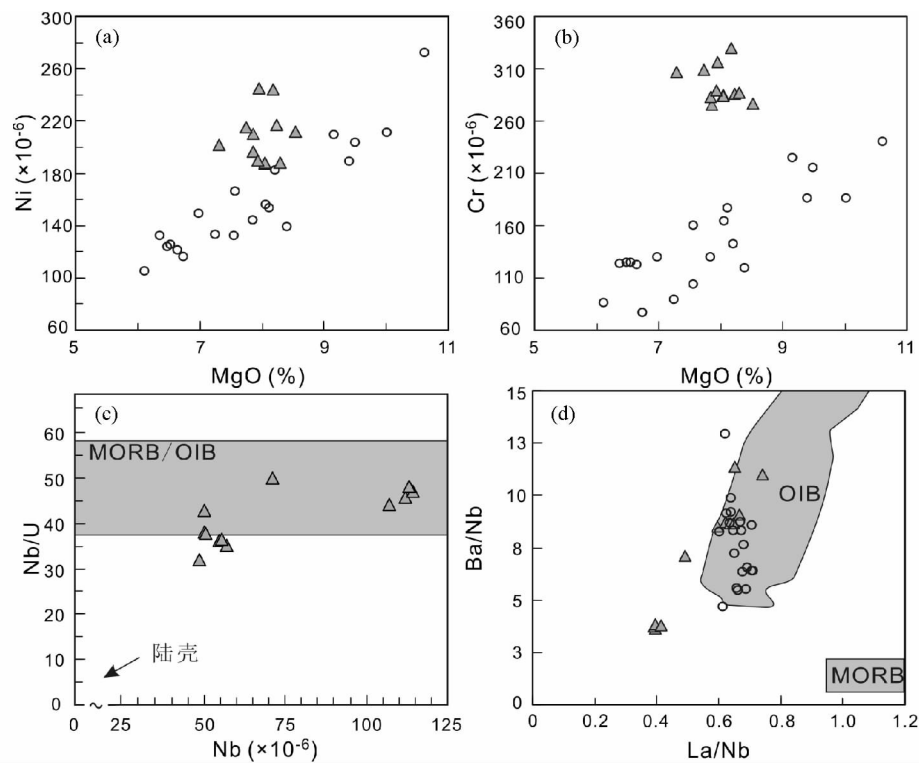


图 6 相容元素 Ni(a)、Cr(b) 与 MgO 二元相关图及 Nb/U-Nb(c)、La/Nb-Ba/Nb(d)变化图
图(c, d)中阴影范围据 Hofmann *et al.* (1986), OIB 和 MORB 区域据 Sun and McDonough (1989)
Fig. 6 Plots of Ni(a) and Cr(b) vs. MgO and diagrams of Nb/U vs. Nb (c), La/Nb vs. Ba/Nb(d)

表 2 鹤壁玄武岩全岩 Sr, Nd 和 Hf 同位素组成

Table 2 Sr, Nd and Hf isotopic compositions of basalts from Hebi

样品号	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr _i	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2σ	ε _{Nd} (t)	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	ε _{Hf} (t)
浮山岩体												
FS-1	0.0553	0.704233	19	0.70423	0.1255	0.512679	8	0.8	0.0081	0.282926	8	5.5
FS-2	0.0775	0.704234	15	0.70423	0.1227	0.512681	8	0.9	0.0074	0.282911	8	5.0
FS-3	—	—	—	—	—	—	—	—	0.0079	0.282966	38	6.9
FS-5	0.0702	0.704228	19	0.70422	0.1231	0.512671	6	0.7	0.007	0.282925	8	5.5
10JH001	0.0197	0.704144	20	0.70414	0.1355	0.512789	8	3.0	0.0058	0.282966	10	6.9
10JH002	0.0516	0.704145	17	0.70414	0.136	0.512791	7	3.0	0.0059	0.282969	11	7.0
10JH003	0.0257	0.704379	19	0.70438	0.1307	0.512725	6	1.7	0.0069	0.282955	9	6.5
10JH004	0.0674	0.704416	14	0.70441	0.1292	0.512657	8	0.4	0.0069	0.282929	11	5.6
黑山岩体												
10JH005	0.0606	0.703609	14	0.70361	0.132	0.512906	7	5.3	0.0047	0.283044	9	9.7
10JH006	0.0612	0.703688	21	0.70368	0.1305	0.512911	9	5.4	0.0049	0.283039	8	9.5
10JH007	0.0604	0.703637	16	0.70363	0.1301	0.512907	9	5.3	0.005	0.283042	7	9.6
10JH008	0.0585	0.703678	23	0.70367	0.1322	0.512907	10	5.3	0.0049	0.283042	9	9.6

注:球粒陨石的¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd 和¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 现今值分别为 0.1968 和 0.512638, λ 为 6.54 × 10⁻¹² a⁻¹; ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 和¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 现今值分别为 0.0332 和 0.282772(Blichert-Toft and Albarede, 1997; Griffin *et al.* , 2000), λ 为 1.867 × 10⁻¹¹ a⁻¹ (Söderlund *et al.* , 2004)

5.1 岩浆演化过程

显微镜下观察,鹤壁玄武岩岩石样品除橄榄石斑晶发生伊丁石化外,未见其它矿物和基质发生后期蚀变,且鹤壁玄

武岩的主量元素分析结果显示(表 1),烧失量平均值为 1.0%,也进一步说明样品新鲜。

与大洋岩石圈不同,大陆具有巨厚的岩石圈地幔和地壳,幔源岩浆上升运移过程中,通常遭受大陆岩石圈物质的

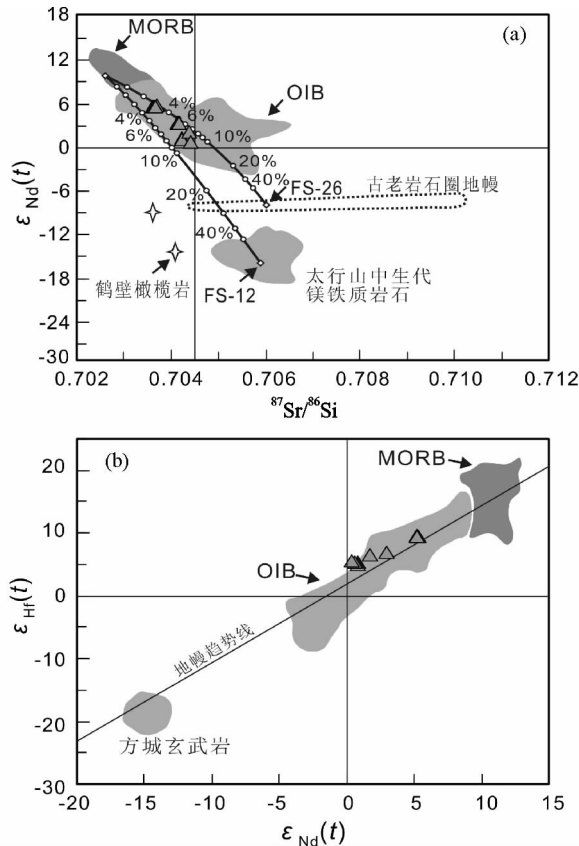


图7 玄武岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ - $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 相关图(a)和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 相关图(b)

图(a)中: MORB 和 OIB 数据引自 Zindler and Hart (1986), 古老岩石圈地幔数据引自 Zhang *et al.* (2002), 太行山中生代镁铁质岩石数据引自 Zhang *et al.* (2004); 混合模型曲线参数: FS-26, FS-12 为繁峙地幔橄榄岩, 据 Tang *et al.* (2006), 软流圈数据引自 Flower *et al.* (1998); 图(b)中: MORB 和 OIB 及地幔趋势线数据引自 Nowell *et al.* (1998), 方城玄武岩数据引自 Zhang *et al.* (2002), 杨岳衡等 (2006); 鹤壁橄榄岩 Sr-Nd 数据引自 Tang *et al.* (2012)

Fig. 7 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (a) and $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (b) plots for basalts

混染。然而, 鹤壁玄武岩具有较高的 MgO、Cr 和 Ni 含量, 较低的 SiO_2 , 并且在原始地幔标准化蛛网图上具有明显的正 Nb、Ta 异常, 而大陆地壳的显著特征是具有明显的负 Nb、Ta 异常。其 Nb/U 值与 MORB/OIB (47 ± 7 ; Hofmann *et al.*, 1986) 相同, 明显高于陆壳的 Nb/U 比值 (图 6c)。其它不相容元素含量如 Sr ($709 \times 10^{-6} \sim 1056 \times 10^{-6}$)、Ba ($405 \times 10^{-6} \sim 569 \times 10^{-6}$), 显著高于下部陆壳的平均值 ($\text{Sr} = 320 \times 10^{-6}$, $\text{Ba} = 456 \times 10^{-6}$; Rudnick and Gao, 2003)。再者, 鹤壁玄武岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ 比值与 MgO 也并未出现由于陆壳混染所引起的正相关关系。因此, 鹤壁新生代玄武岩在形成过程中未遭受明显的地壳物质混染。

鹤壁新生代玄武岩中含有橄榄石和辉石的斑晶, 表明岩

浆在演化过程中可能经历了橄榄石和辉石的分离结晶作用。微量元素相关图表明鹤壁玄武岩与汉诺坝碱性玄武岩类似, 强不相容元素之间呈现良好的线性关系 (图 8), 也进一步说明辉石的分离结晶作用。但该区样品的 MgO 含量总体大于 8%, Ni、Cr 含量也位于地幔橄榄岩相平衡的范围内 (Wilkinson and Maitre, 1987), 同时 Ni、Cr 与 MgO 之间并未见任何相关性, 显著区别于经历分离结晶作用的汉诺坝碱性玄武岩 (图 6a, b), 表明橄榄石和辉石的分离结晶作用程度较小。此外, 鹤壁玄武岩在球粒陨石标准化稀土元素配分图上不具有明显的负 Eu 异常 (图 5), 说明斜长石未发生结晶分离作用。

岩相学和全岩地球化学研究表明, 鹤壁新生代碱性玄武岩在形成过程中经历了较弱的橄榄石和辉石分离结晶作用和地壳混染作用, 岩石结晶后期蚀变作用不明显。因此, 这些玄武岩样品 (尤其是高 MgO 样品) 的地球化学特征接近接近原始岩浆的成分, 并可以反应出其地幔源区特征和部分熔融条件。

5.2 地幔源区

鹤壁新生代玄武岩具有贫硅、富镁的特征, 实验岩石学研究表明, 基性和超基性岩浆是上地幔镁铁质岩石部分熔融的产物 (Hirose and Kushiro, 1993; Walter, 2003)。相对饱满的地幔岩石熔融产生的熔体具有较高的 Ti 和 Fe 含量 (Falloon *et al.*, 1988), 鹤壁碱性玄武岩的 $\text{TiO}_2 = 2.1\% \sim 2.7\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3^T = 11.4\% \sim 13.7\%$, 说明它们来源于一个相对饱满的地幔源区, 其源区在鹤壁碱性玄武岩形成之前, 未经历大程度熔体的抽离。鹤壁新生代碱性玄武岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ 比值, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 $0.7036 \sim 0.7044$, $+0.4 \sim +5.4$ 和 $+5.0 \sim +9.7$, 呈现不均一的亏损同位素组成特征。在 Sr-Nd 和 Nd-Hf 同位素相关图上 (图 7), 分布在 OIB 范围之内, 并呈现明显的线性关系, 类似于中国东部其它地区新生代碱性玄武岩 (Zhou and Armstrong, 1982; Zhang *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2011), 表明至少两个端元组分参与了鹤壁新生代碱性玄武岩的成岩作用, 即亏损地幔 (DM) 和富集地幔 (EM)。其中亏损地幔为软流圈或者新生岩石圈地幔, 而富集地幔则可能是 I 型富集地幔 (EMI, Zhou and Armstrong, 1982; Zhi *et al.*, 1990) 或者 II 型富集地幔 (EMII, Zou *et al.*, 2000)。但根据鹤壁玄武岩中地幔包体研究表明, 虽然华北东部岩石圈地幔在古生代以来发生地幔性质的强烈改变, 200km 左右冷的、密度低、同位素富集的古老岩石圈地幔被 70~100km 热的、密度大的、同位素亏损的新生岩石圈地幔所代替 (Fan and Menzies, 1992; Griffin *et al.*, 1992, 1998; Menzies *et al.*, 1993), 但在鹤壁地区之下岩石圈地幔仍以残存古老的岩石圈地幔为主 (Zheng *et al.*, 2001, 2007; Tang *et al.*, 2006, 2012)。最近的研究发现, 鹤壁古老地幔包体的 Sr-Nd 同位素变化较大, 且存在亏损特征的样品, 可能是后期熔体改造作用的结果 (Tang *et al.*, 2011; Sun

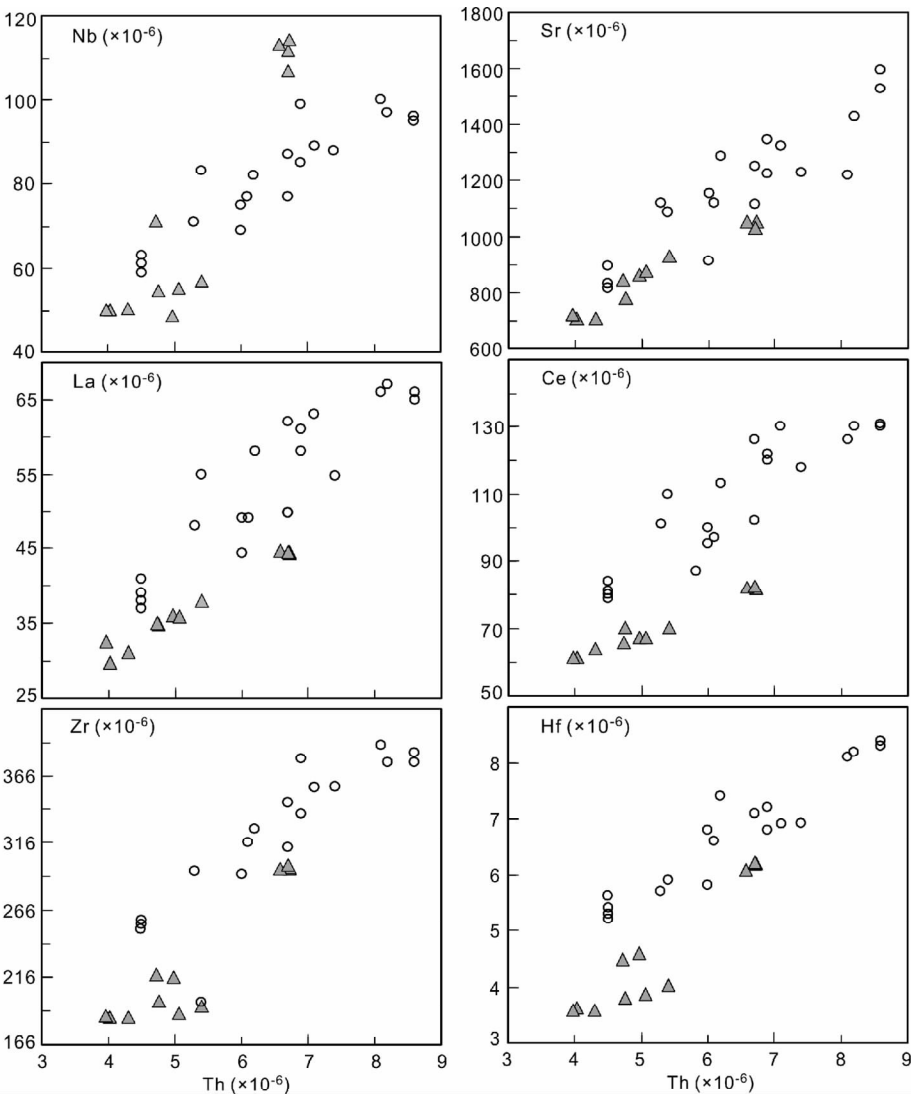


图 8 不相容元素与 Th 的关系图
数据来源同图 3
Fig. 8 Contents of incompatible elements vs. Th

et al., 2012),其代表的地幔所熔出的玄武岩浆同样可以具有类似鹤壁碱性玄武岩的亏损性质。但是这些样品富集 LILE, 亏损 HFSE, 与鹤壁碱性玄武岩明显不同, 故这种岩石圈地幔不可能是其地幔源区。因此, 鹤壁新生代玄武岩中亏损地幔组分特征应来源于软流圈地幔。

富集地幔端元组分可能为上覆的古老岩石圈地幔, 而前人研究表明只有饱满的地幔岩石才能熔出玄武质组分 (Kelemen *et al.*, 1998; Griffin *et al.*, 1999)。华北克拉通下古老岩石圈地幔经历了大程度熔体的抽离, 很难生成大规模的镁铁质岩浆。再者, 难熔的古老岩石圈地幔经过地幔交代再富集之后发生部分熔融可以形成镁铁质岩浆 (Kelemen *et al.*, 1998; Griffin *et al.*, 1999), 但形成的多为金伯利岩、煌斑岩等岩石。因此, 古老克拉通岩石圈地幔不会成为大陆玄武岩的主要源区, 鹤壁新生代玄武岩的岩浆源区不可能来源

于古老岩石圈地幔, 而是软流圈地幔发生部分熔融的产物。

鹤壁新生代玄武岩的不均一同位素组成表明, 来自软流圈地幔的岩浆在上升过程中与岩石圈地幔橄榄岩发生强烈的相互作用。而根据该岩体中产生的地幔包体的研究表明, 鹤壁地区岩石圈地幔厚度约 80km 左右 (尖晶石相, Zheng *et al.*, 2001)), 并且经历了富集、交代作用, 具有类似于 EMI 的富集 Sr-Nd-Hf 同位素组成, 可能是经俯冲板片来源的富含挥发分的熔/流体交代后的古老岩石圈地幔 (Zhang *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2006; 汤艳杰等, 2006; Tang *et al.*, 2012)。全岩地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素研究表明, 鹤壁碱性玄武岩浆是由软流圈熔融而成的熔体与 EMI 型富集的古

老岩石圈地幔橄榄岩相互作用的产物。根据 Sr-Nd 同位素的二端元混合模拟计算 (图 7a) 得出富集端元组分约占 4%~10%, 如此小比例的混合对玄武岩的主量元素和微量元素

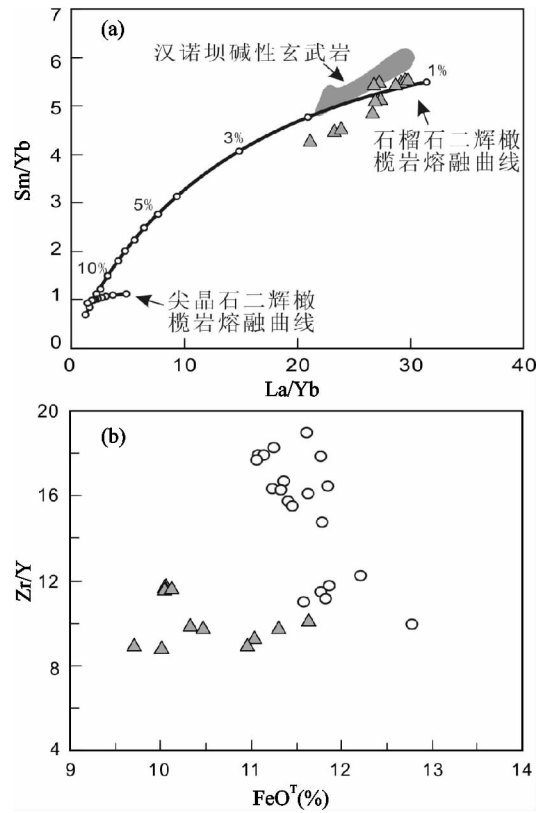


图9 La/Yb-Sm/Yb变化图(a)和 FeO^{T} -Zr/Y变化图(b)

图(a)中曲线为地幔岩石批次部分熔融曲线, 曲线旁数字代表熔融比例; 源岩矿物组分和矿物熔融比例数据引自 Johnson *et al.* (1990), 元素分配系数数据 McKenzie and O' Nions. (1991); 图(b)中 FeO^{T} (%)由 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ (%)等摩尔Fe含量计算得出, 数据来源同图3

Fig. 9 La/Yb vs. Sm/Yb(a) and FeO^{T} vs. Zr/Y (b) for Hebi basalts

改变不明显, 这与该区样品的主微量元素的特征相一致。

综上所述, 鹤壁新生代玄武岩是由软流圈地幔部分熔融而成, 并有少量EMI型的古老岩石圈地幔物质加入, 这与太行山其他地区新生代玄武岩的成因具有一致性(Tang *et al.*, 2006)。

5.3 熔融深度与程度

玄武岩的硅饱和程度与熔融深度有关(DePaolo and Daley, 2000), 硅不饱和的碱性岩浆产生的压力要高于硅饱和的拉斑质玄武岩浆。Nohda *et al.* (1991)提出华北的拉斑玄武岩的源区压力为15~20kbar(50~60km), 而碱性玄武岩的源区压力为25~30kbar(>80km)。鹤壁新生代玄武岩全部为碱性玄武岩, 且具有软流圈地幔的亏损同位素特征, 可知其地幔源区应不小于80km。鹤壁新生代玄武岩明显富集轻稀土元素, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 15.1 \sim 21.4$ 、 $(\text{Dy}/\text{Yb})_{\text{N}} = 2.1 \sim$

2.4。实验岩石学研究表明, 轻重稀土元素强烈分馏的原因可能是源区存在石榴石。对于石榴石来说, Yb 是的相容元素而 La、Sm 是不相容元素, 石榴石相橄榄岩部分熔融程度越低, 对应的 La/Yb 和 Sm/Yb 分异作用越明显; 在尖晶石相橄榄岩部分熔融作用中, La/Yb 变化较小、Sm/Yb 基本不变化, 因此 La/Yb-Sm/Yb 图解常用于区分来自石榴石相橄榄岩和尖晶石相橄榄岩源区的玄武岩(Xu *et al.*, 2005)。鹤壁碱性玄武岩的 La/Yb-Sm/Yb 分布图中可以看出(图9a), 该地区玄武岩投在石榴石二辉橄榄岩熔融模拟曲线上, 且熔融程度较小约1%~3%。另外, 该地区新生代玄武岩包体以尖晶石二辉橄榄岩为主, 仅发现极少量的具尖晶石/石榴石相转变特征的互相共存(Gt + Sp + Cpx + Opx + Ol)二辉橄榄岩, 并未发现典型四相特征的石榴石橄榄岩, 据尖晶石/石榴石二辉橄榄岩计算的形成压力为1970Mpa, 约相当于65km深度, (樊祺诚和刘若新, 1994; 樊祺诚和隋建立, 2009)。这些证据说明岩浆源区应主要为>65km的石榴石相软流圈地幔。不相容元素Zr/Y比值受部分熔融程度的影响但不受分离结晶作用的影响(Nicholson and Latin, 1992), 可以反映熔融过程, 熔体中的Zr相对于Y更不相容, 熔融程度越低, Zr/Y比值越高; 实验证明地幔熔体产生过程中, FeO随熔融深度的增加或源区压力的增大而加大(Nicholson and Latin, 1992; Langmuir *et al.*, 1993)。因而, 熔融程度越低的熔体成分其Zr/Y越低而FeO含量越高。该地区岩石Zr/Y值未发生变化(图9b), 说明熔融程度变化不大, 与上述模拟计算结果一致。

6 地球动力学背景

太行山地区自中生代以来发育有两期的幔源岩浆活动, 第一期岩浆活动主要集中于晚中生代, 岩浆成分有着EMI型富集的Sr-Nd同位素特征, 由古老的岩石圈地幔熔融产生; 第二期岩浆活动发生于古近纪晚期到新近纪, 岩浆成分均显现出亏损的同位素特征, 起源于软流圈地幔(Zhang *et al.*, 2004; Tang *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2006; 汤艳杰等, 2006), 两期岩浆活动之间则缺少基性岩浆作用。这些岩浆演化特征可以用拉张环境下的岩石圈演化来解释。实验岩石学证明大陆在拉张过程中首先会发生富水岩石圈地幔的熔融抽取作用, 这种抽取使得岩石圈地幔变“干”且短时间内无法补回, 因而不发生熔融作用, 同时拉伸作用使得岩石圈逐渐减薄, 当厚度小于65~80km时, 软流圈地幔便开始发生熔融, 即基性岩浆的地幔源区由岩石圈地幔转变为软流圈地幔, 且中间会出现一岩浆间隔期(Gallagher and Hawkesworth, 1992; 徐义刚, 2006)。据此, 我们认为鹤壁所处的太行山地区的古老岩石圈地幔在中生代以前受元古代俯冲作用而富水, 随后因拉张作用发生减薄熔融生成基性岩浆, 并使得原本富水的岩石圈地幔失水, 变干的岩石圈地幔在拉张作用下继续减薄但不会发生熔融作用, 到始新世时,

软流圈地幔开始发生小程度熔融作用,进而造成碱性玄武岩的喷发。

太行山地区的新生代玄武岩浆作用的动力学机制一直未有定论。一种观点认为与印度-欧亚板块碰撞有关,印度板块的北向俯冲推挤作用造成鄂尔多斯块体的逆时针旋转,外围发育上新世-第四纪裂谷系,该伸展作用促使太行山地区岩石圈拉伸减薄,软流圈物质上涌产生玄武岩浆作用(Ren *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2003; Tang *et al.*, 2006)。另一种观点认为与太平洋的西向俯冲有关,全球地震层析揭示俯冲的太平洋板片已停滞在中国东部岩石圈下的转换带内(Fukao *et al.*, 1992; Zhao, 2004),其西端水平延伸至太行山重力梯度带之下(Pei *et al.*, 2004),俯冲地幔楔内的地幔环流促使西部的地幔物质向东部补充,由于东西部岩石圈厚度差异,东移的地幔流减压熔融产生岩浆作用(牛耀龄, 2005),同时 Zhao *et al.* (2011) 也据地球物理资料得出太行山地区岩石圈下部的上涌地幔流与印度-欧亚碰撞无关。大兴安岭-太行山重力梯度带是这两种构造域的边界(Xu, 2007),究竟该地区的新生代岩浆作用受控于单一机制还是两种机制的共同作用,还需要进一步的研究来限制。

7 结论

鹤壁新生代玄武岩为碱性玄武岩,包括碱性橄榄玄武岩和碧玄岩两类。岩石的岩浆演化过程中未发生显著的地表改造,地壳混染和分离结晶作用,全岩成分可用于研究其源区特征和熔融性质。全岩地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素组成指示其由石榴石相的软流圈地幔经小程度的熔融而成,且熔体在上升过程中与 EMI 型的古老岩石圈地幔橄辉岩发生了相互作用。

致谢 衷心感谢樊祺诚研究员和匿名评审专家对本文初稿提出的建设性意见。测试工作得到了中国科学院地质与地球物理研究所多接受电感耦合等离子体质谱实验室老师的指导与帮助,在此一并致谢。

References

- Balcaen L, Schrijver ID, Moens L and Vanhaecke F. 2005. Determination of the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratio in USGS silicate reference materials by multi-collector ICP-mass spectrometry. *International Journal of Mass Spectrometry*, 242(2-3): 251-255
- Basu AR, Wang JW, Huang WK, Xie GH and Tatsumoto M. 1991. Major element, REE, and Pb, Nd, and Sr isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rocks of eastern China: Implications for their origin from suboceanic-type mantle reservoirs. *Earth Planetary Science Letters*, 105(1-3): 149-169
- 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(1-2): 243-258
- Chung SL. 1999. Trace element and isotope characteristics of Cenozoic basalts around the Tanlu fault with implications for the eastern plate boundary between North and South China. *The Journal of Geology*, 107(3): 301-312
- DePaolo DJ and Daley EE. 2000. Neodymium isotopes in basalts of the southwest basin and range and lithospheric thinning during continental extension. *Chemical Geology*, 169(1-2): 157-185
- Falloon TJ, Green DH, Hutton CJ and Harris KL. 1988. Anhydrous partial melting of a fertile and depleted peridotite from 2 to 30 kb and application to basalt petrogenesis. *Journal of Petrology*, 29(6): 1257-1282
- Fan QC and Hooper PR. 1991. The Cenozoic basaltic rocks of eastern China: Petrology and chemical composition. *Journal of Petrology*, 32(4): 765-810
- Fan QC and Liu RX. 1994. Spinel-garnet lherzolite in Late Tertiary limburgitic pipe from Hebi, Henan Province and its genesis. In: Ouyang ZY (ed.). *New Progress in Mineralogy, Petrology and Geochemistry Study in China*. Lanzhou: Lanzhou University Press, 141-142 (in Chinese)
- Fan QC and Sui JL. 2009. Phase transition of upper mantle rock in eastern China and its significance. *Earth Science*, 34(3): 387-391 (in Chinese with English abstract)
- Fan WM and Menzies MA. 1992. Destruction of aged lower lithosphere and accretion of asthenosphere mantle beneath eastern China. *Geotectonica Metallogenia*, 16: 171-181
- Fan WM, Zhang HF, Baker J, Jarvis KE, Mason PRD and Menzies MA. 2000. On and off the North China craton: Where is the Archean Keel? *Journal of Petrology*, 41(7): 933-950
- Farmer GL. 2003. Continental basaltic rocks. In: Holland HD (ed.). *Treatise on Geochemistry*, Volume 3. New York: Elsevier, 85-121
- Flower M, Tamaki K and Hoang N. 1998. Mantle extrusion: A model for dispersed volcanism and Dupal-like asthenosphere in East Asia and the Western Pacific. In: Flower MFJ, Chung SL, Lo CH and Lee TY (eds.). *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*. Geodynamics Series, Vol. 27. AGU, Washington, 67-88
- Fukao Y, Obayashi M, Inoue H and Nishii M. 1992. Subducting slab stagnant in the mantle transition zone. *Journal of Geophysical Research*, 97(B4): 4809-4822
- Gallagher K and Hawkesworth C. 1992. Dehydration melting and the generation of continental flood basalts. *Nature*, 358(6381): 57-59
- Gilder SA, Keller GR, Luo M and Goodell PC. 1991. Eastern Asia and the western Pacific timing and spatial distribution of rifting in China. *Tectonophysics*, 197(2-4): 225-243
- Griffin WL, O'Reilly SY and Ryan CG. 1992. Composition and thermal structure of the lithosphere beneath South Africa, Siberia and China: Proton microprobe studies. In: Abstract of International Symposium on Cenozoic Volcanic Rocks and Deep-seated Xenoliths of China and Its Environs. Beijing, 1-20
- Griffin WL, Zhang AD, O'Reilly SY and Ryan CG. 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean Craton. In: Flower MFJ, Chung SL, Lo CH and Lee TY (eds.). *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*. Geodynamics Series, Vol. 27. AGU, Washington, 107-126
- Griffin WL, O'Reilly SY and Ryan C. 1999. The composition and origin of sub-continental lithospheric mantle. In: Fei Y, Bertka CM and Mysen BO (eds.). *Mantle Petrology: Field Observations and High-Pressure Experimentation*. A Tribute to France R. (Joe) Boyd. Geochemical Society Special Publications, 6: 13-46
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, Van Ackerbergh E, O'Reilly SY and Shee SR. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133-147
- Hirose K and Kushiro I. 1993. Partial melting of dry peridotites at high pressures: Determination of compositions of melts segregated from peridotite using aggregates of diamond. *Earth and Planetary Science Letters*, 114(4): 477-489
- Ho KS, Liu Y, Chen JC, You CF and Yang HJ. 2011. Geochemical characteristics of Cenozoic Jining basalts of the western North China Craton: Evidence for the role of the lower crust, lithosphere, and asthenosphere in petrogenesis. *Terrestrial, Atmospheric and Ocean*

- Sciences, 22(1): 15–40
- Hofmann AW, Jochum KP, Seufert M and White WM. 1986. Nb and Pb in oceanic basalts: New constraints on mantle evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 79(1–2): 33–45
- Hofmann AW. 1997. Mantle geochemistry: The message from oceanic volcanism. *Nature*, 385(6613): 219–229
- Jahn BM, Auvray B, Cornichet J, Bai YL, Shen QH and Liu DY. 1987. 3.5Ga old amphibolites from eastern Hebei Province, China: Field occurrence, petrography, Sm-Nd isochron age and REE geochemistry. *Precambrian Research*, 34(3–4): 311–346
- Johnson KTM, Dick HJB and Shimizu N. 1990. Melting in the oceanic upper mantle: An ion microprobe study of diopsides in abyssal peridotites. *Journal of Geophysical Research*, 95(B3): 2661–2678
- Kelemen PB, Hart SR and Bernstein S. 1998. Silica enrichment in the continental upper mantle via melt/rock reaction. *Earth and Planetary Science Letters*, 164(1–2): 387–406
- Langmuir CH, Klein EM and Plank T. 1993. Petrological systematics of mid-ocean ridge basalts: Constraints on melt generation beneath ocean ridges. *Geophysical Monograph-American Geophysical Union*, 71: 183–183
- Le Maitre RW, Streckeisen A, Zanettin B, Le Bas MJ, Bonin B, Bateman P, Bellieni G, Dubeck A, Keller J, Lameyre J, Sabine PA, Schimid R, Sorensen H and Woollet AR. 2002. *Igneous Rocks: A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*. 2nd Edition. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1–236
- Liu CQ, Masuda A and Xie GH. 1994. Major- and trace-element compositions of Cenozoic basalts in eastern China: Petrogenesis and mantle source. *Chemical Geology*, 114(1–2): 19–42
- Liu DY, Nutman AP, Compston W, Wu JS and Shen QH. 1992. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton. *Geology*, 20(4): 339–342
- Liu JG, Rudnick RL, Walker RJ, Gao S, Wu FY, Piccoli PM, Yuan HL, Xu WL and Xu YG. 2011. Mapping lithospheric boundaries using Os isotopes of mantle xenoliths: An example from the North China Craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(13): 3881–3902
- Liu RX, Sun JZ and Chen WJ. 1983. Cenozoic basalts in North China: Their distribution, geochemical characteristics and tectonic implications. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2(1): 17–33
- Liu RX, Chen WJ, Sun JZ and Li DM. 1992. K-Ar chronology and tectonic settings of Cenozoic volcanic rocks in China. In: Liu RX (ed.). *Geochronology and Geochemistry of Cenozoic Volcanic Rocks in China*. Beijing: Seismological Press, 1–43 (in Chinese)
- Mckenzie DP and O'Nions RK. 1991. Partial melt distributions from inversion of rare earth element concentrations. *Journal of Petrology*, 32(5): 1021–1091
- Menzies M, Fan WM and Zhang M. 1993. Paleozoic and cenozoic lithospheres and loss of > 120km of Archean lithosphere, Sino-Korean craton, China. *Magmatic Processes and Plate Tectonics*, 76. Geological Society, London, Special Publications, 71–81
- Münker C, Weyer S, Scherer E and Mezger K. 2001. Separation of high field strength elements (Nb, Ta, Zr, Hf) and Lu from rock samples for MC-ICPMS measurements. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2(12): 1064–1082
- Nicholson H and Latin D. 1992. Olivine tholeiites from Krafla, Iceland: Evidence for variations in melt fraction within a plume. *Journal of Petrology*, 33(5): 1105–1124
- Niu YL. 2005. Generation and evolution of basaltic magmas: Some basic concepts and a new view on the origin of Mesozoic-Cenozoic basaltic volcanism in eastern China. *Geological Journal of China Universities*, 11(1): 9–46 (in Chinese with English abstract)
- Nohda S, Chen H and Tatsumi Y. 1991. Geochemical stratification in the upper mantle beneath NE China. *Geophysical Research Letters*, 18(1): 97–100
- Nowell GM, Kempton PD, Noble SR, Fitton JG, Saunders AD, Mahoney JJ and Taylor RN. 1998. High precision Hf isotope measurements of MORB and OIB by thermal ionisation mass spectrometry: Insights into the depleted mantle. *Chemical Geology*, 149(3–4): 211–233
- Pei S, Chen YJ and Zhao DP. 2004. Tomographic structure of east Asia: Data and results. AGU Fall Meeting, San Francisco
- Ren JY, Tamaki K, Li ST and Zhang JX. 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 344(3–4): 175–205
- Rudnick RL and Gao S. 2003. Composition of the continental crust. In: Holland HD (ed.). *Treatise on Geochemistry*, Volume 3. New York: Elsevier, 1–64
- Söderlund U, Patchett PJ, Vervoort JD and Isachsen CE. 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3–4): 311–324
- Song Y, Frey FA and Zhi XC. 1990. Isotopic characteristics of Hannuoba basalts, eastern China: Implications for their petrogenesis and the composition of subcontinental mantle. *Chemical Geology*, 88(1–2): 35–52
- Sun J, Liu CZ, Wu FY, Yang YH and Chu ZY. 2012. Metasomatic origin of clinopyroxene in Archean mantle xenoliths from Hebi, North China Craton: Trace-element and Sr-isotope constraints. *Chemical Geology*, 328: 123–136
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345
- Tang YJ, Zhang HF and Ying JF. 2006. Asthenosphere-lithospheric mantle interaction in an extensional regime: Implication from the geochemistry of Cenozoic basalts from Taihang Mountains, North China Craton. *Chemical Geology*, 233(3–4): 309–327
- Tang YJ, Zhang HF, Ying JF and Zhang J. 2006. Source characteristics and temporal-spatial evolution of Mesozoic and Cenozoic basaltic magmatism in the Taihang Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1657–1664 (in Chinese with English abstract)
- Tang YJ, Zhang HF, Nakamura E and Ying JF. 2011. Multistage melt/fluid-peridotite interactions in the refertilized lithospheric mantle beneath the North China Craton: Constraints from the Li-Sr-Nd isotopic disequilibrium between minerals of peridotite xenoliths. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 161(6): 845–861
- Tang YJ, Zhang HF, Ying JF, Su BX, Chu ZY, Xiao Y and Zhao XM. 2012. Highly heterogeneous lithospheric mantle beneath the Central Zone of the North China Craton evolved from Archean mantle through diverse melt refertilization. *Gondwana Research*, 23(1): 130–140
- Walter MJ. 2003. Melt extraction and compositional variability in mantle lithosphere. In: Holland HD (ed.). *Treatise on Geochemistry*, Volume 2. New York: Elsevier, 363–394
- Wang Y, Zhao ZF, Zheng YF and Zhang JJ. 2011. Geochemical constraints on the nature of mantle source for Cenozoic continental basalts in east-central China. *Lithos*, 125(3–4): 940–955
- Wang YJ, Fan WM, Zhang HF and Peng TP. 2006. Early Cretaceous gabbroic rocks from the Taihang Mountains: Implications for a paleosubduction-related lithospheric mantle beneath the central North China Craton. *Lithos*, 86(3–4): 281–302
- Wilkinson JFG and Maitre RWL. 1987. Upper mantle amphiboles and micas and TiO_2 , K_2O , and P_2O_5 abundances and $100\text{Mg}/(\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})$ ratios of common basalts and andesites: Implications for modal mantle metasomatism and undepleted mantle compositions. *Journal of Petrology*, 28(1): 37–73
- Xu YG, Ma JL, Frey FA, Feigenson MD and Liu JF. 2005. Role of lithosphere-asthenosphere interaction in the genesis of Quaternary alkali and tholeiitic basalts from Datong, western North China Craton. *Chemical Geology*, 224(4): 247–271
- Xu YG. 2006. Using basalt geochemistry to constrain Mesozoic-Cenozoic evolution of the lithosphere beneath North China Craton. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 93–104 (in Chinese with English abstract)
- Xu YG. 2007. Diachronous lithospheric thinning of the North China Craton and formation of the Daxin'anling-Taihangshan gravity

- lineament. *Lithos*, 96(1–2): 281–298
- Yang JH, Wu FY, Wilde SA, Belousova E and Griffin WL. 2008. Mesozoic decratonization of the North China block. *Geology*, 36(6): 467–470
- Yang JH, O'Reilly S, Walker RJ, Griffin W, Wu FY, Zhang M and Person N. 2010a. Diachronous decratonization of the Sino-Korean craton: Geochemistry of mantle xenoliths from North Korea. *Geology*, 38(9): 799–802
- Yang YH, Zhang HF, Xie LW, Liu Y, Qi CS and Tu XL. 2006. Petrogenesis of typical Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from the North China Craton: New evidence from Hf isotopic studies. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1665–1671 (in Chinese with English abstract)
- Yang YH, Zhang HF, Chu ZY, Xie LW and Wu FY. 2010b. Combined chemical separation of Lu, Hf, Rb, Sr, Sm and Nd from a single rock digest and precise and accurate isotope determinations of Lu-Hf, Rb-Sr and Sm-Nd isotope systems using Multi-Collector ICP-MS and TIMS. *International Journal of Mass Spectrometry*, 290(2–3): 120–126
- Yang YH, Chu ZY, Wu FY, Xie LW and Yang JH. 2011a. Precise and accurate determination of Sm, Nd concentrations and Nd isotopic compositions in geological samples by MC-ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26(6): 1237–1244
- Yang YH, Wu FY, Xie LW, Yang JH and Zhang YB. 2011b. High-precision direct determination of the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratio of bottled Sr-rich natural mineral drinking water using multiple collector inductively coupled plasma mass spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 66(8): 656–660
- Yarmolyuk VV, Kudryashova EA, Kozlovskiy AM and Savatenkov VM. 2011. Late Cenozoic volcanic province in Central and East Asia. *Petrology*, 19(4): 327–347
- Ye H, Zhang BT and Mao FY. 1987. The Cenozoic tectonic evolution of the Great North China: Two types of rifting and crustal necking in the Great North China and their tectonic implications. *Tectonophysics*, 133(3–4): 217–227
- Zhang HF, Sun M, Zhou XH, Fan WM, Zhai MG and Ying JF. 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: Evidence from major, trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 144(2): 241–253
- Zhang HF, Min S, Zhou MF, Fan WM, Zhou XH and Zhai MG. 2004. Highly heterogeneous Late Mesozoic lithospheric mantle beneath the North China Craton: Evidence from Sr-Nd-Pb isotopic systematics of mafic igneous rocks. *Geological Magazine*, 141(1): 55–62
- Zhang JJ, Zheng YF and Zhao ZF. 2009. Geochemical evidence for interaction between oceanic crust and lithospheric mantle in the origin of Cenozoic continental basalts in east-central China. *Lithos*, 110(1–4): 305–326
- Zhang YQ, Ma YS, Yang N, Shi W and Dong SW. 2003. Cenozoic extensional stress evolution in North China. *Journal of Geodynamics*, 36(5): 591–613
- Zhao DP. 2004. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: Insight into deep Earth dynamics. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 146(1–2): 3–34
- Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Sun M. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Research*, 107(1–2): 45–73
- Zhao L, Zheng TY, Gang L and Ai YS. 2011. No direct correlation of mantle flow beneath the North China Craton to the India-Eurasia collision: Constraints from new SKS wave splitting measurements. *Geophysical Journal International*, 187(2): 1027–1037
- Zhao XM, Zhang HF, Zhu XK, Zhang WH, Yang YH and Tang YJ. 2007. Metasomatism of Mesozoic and Cenozoic lithospheric mantle beneath the North China Craton: Evidence from phlogopite-bearing mantle xenoliths. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1281–1293 (in Chinese with English abstract)
- Zheng JP, O'Reilly SY, Griffin WL, Lu FX, Zhang M and Pearson NJ. 2001. Relict refractory mantle beneath the eastern North China block: Significance for lithosphere evolution. *Lithos*, 57(1): 43–66
- Zheng JP, Griffin WL, O'Reilly SY, Yu CM, Zhang HF, Pearson N and Zhang M. 2007. Mechanism and timing of lithospheric modification and replacement beneath the eastern North China Craton: Peridotitic xenoliths from the 100Ma Fuxin basalts and a regional synthesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(21): 5203–5225
- Zhi XC, Song Y, Frey FA, Feng JL and Zhai MZ. 1990. Geochemistry of Hannuoba basalts, eastern China: Constraints on the origin of continental alkalic and tholeiitic basalt. *Chemical Geology*, 88(1–2): 1–33
- Zhou XH and Armstrong LR. 1982. Cenozoic volcanic rocks of eastern China—secular and geographic trends in chemistry and strontium isotopic composition. *Earth and Planetary Science Letters*, 58(3): 301–329
- Zindler A and Hart SR. 1986. Chemical geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14: 493–571
- Zou HB, Zindler A, Xu XS and Qi Q. 2000. Major, trace element, and Nd, Sr and Pb isotope studies of Cenozoic basalts in SE China: Mantle sources, regional variations, and tectonic significance. *Chemical Geology*, 171(1–2): 33–47

附中文参考文献

- 樊祺诚, 刘若新. 1994. 河南鹤壁晚第三纪玻基辉橄岩筒中尖晶石/石榴石二辉橄榄岩及成因. 见: 欧阳自远主编. 中国矿物岩石学地球化学研究新进展. 兰州: 兰州大学出版社, 141–142
- 樊祺诚, 隋建立. 2009. 中国东部上地幔岩石相转变及其意义. *地球科学*, 34(3): 387–391
- 刘若新, 陈文寄, 孙建中, 李大明. 1992. 中国新生代火山岩的 K-R 年代与构造环境. 见: 刘若新主编. 中国新生代火山岩年代学与地球化学. 北京: 地震出版社, 1–43
- 牛耀龄. 2005. 玄武岩浆起源和演化的一些基本概念以及对中国东部中-新生代基性火山岩成因的新思路. *高校地质学报*, 11(1): 9–46
- 汤艳杰, 张宏福, 英基丰, 张瑾. 2006. 太行山地区中-新生代玄武质岩浆的源区特征与时空演化. *岩石学报*, 22(6): 1657–1664
- 徐义刚. 2006. 用玄武岩组成反演中-新生代华北岩石圈的演化. *地学前缘*, 13(2): 93–104
- 杨岳衡, 张宏福, 谢烈文, 刘颖, 祁昌实, 涂湘林. 2006. 华北克拉通中-新生代典型火山岩的岩石成因: Hf 同位素新证据. *岩石学报*, 22(6): 1665–1671
- 赵新苗, 张宏福, 朱祥坤, 张文慧, 杨岳衡, 汤艳杰. 2007. 华北中-新生代岩石圈地幔的交代作用: 含金云母地幔岩提供的证据. *岩石学报*, 23(6): 1281–1293