

doi:10.3799/dqkx.2010.073

大别山早白垩世基性脉岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及成因

王世明¹, 马昌前^{1,2*}, 王琳燕¹, 张金阳³, 杨颖¹

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

摘要: 研究大别山早白垩世大规模伸展开始时间及地幔属性。采用 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年法, 测得北淮阳金寨银沙畈辉长脉岩年龄为 125.8 ± 2.7 Ma, 西大别大悟东新乡闪斜煌斑脉岩年龄为 129.6 ± 2.5 Ma; 大别山不同区块早白垩世基性脉岩的地球化学特征类似: SiO_2 介于 46.13%~54.42%, $\text{Mg}^{\#}$ 在 42~72 之间, 大多属碱性系列; LREE 富集, HREE 亏损, 大离子亲石元素(LILE)富集, 高场强元素(HFSE)Nb、Zr、Ti 亏损; I_{Sr} 在 0.7055~0.7094 之间, 低 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ ($-12.04 \sim -18.84$) 值, Nd 模式年龄(T_{DM})为 $1.60 \sim 2.62$ Ga。大别山早白垩世的地壳伸展、大规模岩浆活动开始于 130 Ma, 属于整个中国东部晚中生代岩石圈伸展减薄事件的一部分。基性脉岩来源于富集岩石圈地幔, 主要为扬子俯冲陆壳同华北岩石圈地幔混合产物, 有部分软流圈地幔物质的加入。

关键词: 大别山; 基性脉岩; 锆石 U-Pb 年龄; 早白垩世; 富集岩石圈地幔; 地球化学。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2010)04-0572-13

收稿日期: 2009-09-15

SHRIMP Zircon U-Pb Dating, Geochemistry and Genesis of Early Cretaceous Basic Dykes from the Dabie Orogen

WANG Shi-ming¹, MA Chang-qian^{1,2*}, WANG Lin-yan¹, ZHANG Jin-yang³, YANG Ying¹

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: This paper aims to constrain the starting time of Early Cretaceous large-scale extensional and mantle properties in Dabie orogen. The SHRIMP zircon U-Pb dating results reveal the Yinshafan gabbro dyke from Jinzhai, North Huaiyang region is 125.8 ± 2.7 Ma, the Dongxinxiang lamprophyre dyke from Dawu, West Dabie is 129.6 ± 2.5 Ma. The Early Cretaceous basic dykes from different regions of the Dabie Orogen show similar geochemical features: These samples have SiO_2 ranging from 46.13% to 54.42%, $\text{Mg}^{\#}$ between 42 and 72, mainly belonging to alkaline series, enrichment in light rare earth elements (LREE) and large ion lithophile elements (LILE), evident depletion in high field strength elements (HFSE, e.g., Nb, Zr and Ti), $I_{\text{Sr}} = 0.7055 \sim 0.7094$ and highly negative $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values of about -12.04 to -18.84 , $T_{\text{DM}} = 1.60 \sim 2.62$ Ga. Early Cretaceous crustal extension and large-scale magma eruption in the Dabie orogenic belt began in 130 Ma, and belonged to part of eastern China Late Mesozoic lithospheric thinning extension event. The basic dykes were derived from enriched lithospheric mantle, which originated from North China Craton (NCC) lithospheric mantle contaminated by the deeply subducted Yangtze crust, and maybe have been added in some mantle asthenosphere.

Key words: Dabie mountains; basic dykes; zircon U-Pb dating; Early Cretaceous; enriched lithospheric mantle; geochemistry.

脉岩的广泛出露代表地壳强烈伸展减薄的构造环境,特别是其中的基性脉岩,包含丰富的幔源信息,是大陆裂解、伸展作用的标志,其空间展布对恢复古构造应力场和古大陆位置具有重要意义。如通过对全球广泛分布的前寒武纪基性岩墙的研究,探讨超大陆裂解等重大地质历史事件(Halls *et al.*, 2001, 2004)。近年来国内学者对华北、秦岭、东南沿海等地的基性脉岩也进行了研究(李献华等,1997;张成立等,1999;邵济安和张履桥,2002;王岳军等,2007)。大别造山带是世界上最大的超高压变质岩区,也是陆—陆碰撞造山作用结束之后岩浆活动最为强烈的地区。大量年代学研究表明,大别造山带大规模的岩浆活动主要发生在早白垩世(120~138 Ma)(Jahn *et al.*, 1999;李曙光等,1999; Xu *et al.*, 2007; Zhao *et al.*, 2007b),侵入岩以中酸性为主,其次为镁铁—超镁铁和碱性岩,同时可见大量近同期的中酸性、基性脉岩穿插岩体。这些中酸性及基性侵入体在年龄上重合,Sr-Nd 同位素特征上类似,都呈现低的负 ϵ_{Nd} 值(李曙光等,1998; Ma *et al.*, 1998, 2000),表明该期岩浆事件既包括大规模地壳部分熔融,也包括深部地幔的部分熔融。本文通过对大别山不同区域出露的 11 条早白垩世基性脉岩的地球化学特征及年代学研究,分析了其源区性质及形成的大地构造背景,通过与华北及华南同时代基

性脉岩的对比,探讨它们与整个中国东部晚中生代岩石圈伸展减薄事件的关系。

1 地质背景及岩相学

大别山早白垩世基性脉岩分布较广,与晚中生代中酸性岩体密切共生。基性脉岩种类繁多,包括辉长岩、辉绿(玢)岩、煌斑岩等。脉岩走向以北东东为主,部分呈北西向,倾角较陡,切割穿插岩体,与围岩界线清楚。单条脉岩宽 0.1~5 m,偶出现“扁豆状”构造,或被断层错开。脉岩大多数结构较均匀,部分脉岩发育宽 1~5 cm、颜色较深的冷凝边,脉岩边缘偶见围岩的斑晶和捕虏体。样品采样位置及岩脉走向见图 1。

样品 04-158-1 辉长岩采自金寨银沙畈(GPS: N31°35. 819'; E115°30. 549')。镜下具辉长石结构,主要矿物为斜长石、辉石、角闪石和绿泥石。斜长石为板柱状,发育聚片双晶或卡钠复合双晶,部分明显高岭石化,但双晶纹清晰可见;辉石呈自形板状,可见简单双晶,部分蚀变为绿泥石,在颗粒边缘仍可见未发生蚀变的辉石残晶;角闪石呈他形,粒度较小,可见两组解理;磁铁矿、榍石、磷灰石少量。

样品 04-163-2 闪斜煌斑岩采自大悟县东新乡采石场(GPS: N31°36. 683'; E114°13. 225'),脉岩野

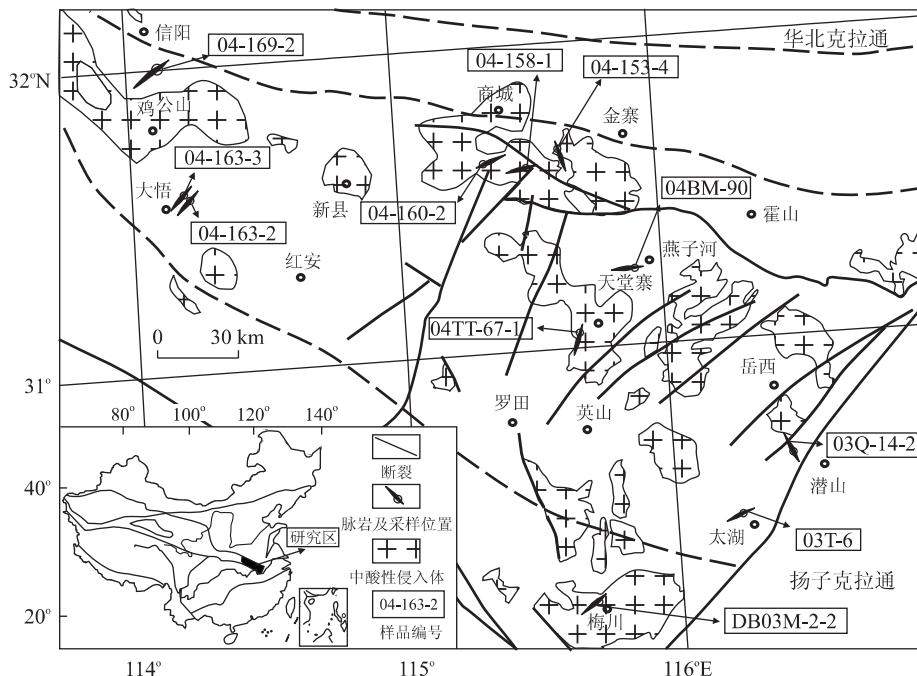


图 1 大别山早白垩世基性脉岩采样位置

Fig. 1 Location map showing Early Cretaceous basic dykes from the Dabie orogen

外产状 $310^{\circ} \angle 53^{\circ}$, 侵入斑状二长花岗岩中。镜下具典型的煌斑结构, 斑晶以角闪石为主, 部分为斜长石; 基质为角闪石、斜长石、黑云母, 磷灰石、榍石和少量磁铁矿。斑晶斜长石呈自形板柱状, 部分明显高岭石化, 角闪石呈自形粒状。基质中角闪石分布于斜长石晶体间, 斜长石呈细小板状, 具双晶, 该岩石遭受次生变化, 部分角闪石已变成黑云母及绿泥石, 有时尚可找到未蚀变完的角闪石残晶, 斜长石多遭受绢云母化。斑晶角闪石为 5%~7%, 斜长石 5%~7%, 基质中角闪石 20%~35%, 斜长石 35%~40%, 绿泥石 15% 左右, 黑云母约 5%。

2 分析测试方法

2.1 锆石 U-Pb 年龄

将岩石样品粉碎至 60 目左右, 通过淘洗和重磁分选分离出锆石, 在双目镜下挑选出相对纯净、晶形较好的锆石制靶。对锆石样品进行反射光、透射光和阴极发光照相后, 将其表面镀金膜以待测试。锆石年齡测试在北京离子探针中心的 SHRIMP II 型离子探针上采用标准测定程序进行, 测试过程中一次离子流 O^{2-} 强度为 9 nA, 一次离子流束斑直径为 $30 \mu m$ 左右, 每个数据点测定由 5 次扫描构成。采用标样 SL13(年齡 572 Ma, U 含量 $238 \mu g/g$) 标定 U 和 Th 的含量, 标样 TEM(年齡 417 Ma) 用于校正年齡, 每 5 次样品分析后进行一次 TEM 标样分析。数据处理采用 SQUID 和 ISOPLOT 程序。应用实测 ^{204}Pb 校正锆石中的普通铅, 采用 $^{206}Pb/^{238}U$ 年齡进行加权平均。详细的制靶分析流程和原理见参考文献 Williams(1998) 和宋彪等(2002)。

2.2 主量元素、微量元素及 Sr-Nd 同位素

主量元素化学分析由湖北省地质实验研究所完成, 除 H_2O 采用重量法、 CO_2 采用非水滴定法分析外, 其余氧化物都由 X 荧光光谱 α -系数法测定, 分析精度(相对误差)除 H_2O 外为 1%。微量元素含量在中国科学院地质与地球物理研究所利用等离子光谱质谱法(ICP-MS)测定, 经标准样品 GSR-1 监控测定精度优于 5%。测定含量高于 10×10^{-6} 的元素时, 分析误差小于 5%, 测定含量低于 10×10^{-6} 的元素时, 分析误差小于 8%, Cr、Ni、V 和 Sc 元素的分析误差在 10% 左右。Sr-Nd 同位素在中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素地球化学实验室完成, 测试仪器为 MAT-262 热电离质谱仪, Sr 和 Nd

同位素的分馏校正分别采用 $^{86}Sr/^{88}Sr = 0.1194$ 和 $^{146}Nd/^{144}Nd = 0.7219$, 详细的实验流程可见 Chen et al. (2000, 2002)。

3 分析测试结果

3.1 SHRIMP 锆石 U-Pb 年齡

样品 04-158-1 辉长脉岩锆石相对均一, 无色、浅粉色调为主, 透明一半透明(双目镜下), 晶体较大, 虽然多数破碎但仍保留了部分较好的晶面和晶形, 显示较宽的振荡环带(CL 图像), 具有高的 Th/U 比值(均 >1.0), 这些特征均说明所测锆石是基性岩中的典型岩浆锆石。样品共测定 9 颗锆石上的 9 个测点, 测试结果列于表 1, 9 个测点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年齡分布集中(图 2a), 加权平均年齡为 125.8 ± 2.7 Ma。

样品 04-163-2 闪斜煌斑脉岩分选出的锆石相对均一, 以无色、淡黄等较浅的色调为主, 透明一半透明, 自形, 主要为柱状和粒状的细小颗粒, 粒径在 $50 \sim 150 \mu m$ 之间, 长宽比一般为 $1.0 \sim 2.0$, 晶面平直, 韵律环带结构发育(CL 图像)。对该样品中的锆石共进行了 10 个点的分析, 分析结果列于表 1, 10 个测点除了一个锆石的分析点 2.1 给出了较年轻年齡(112 ± 15 Ma)外, 大多数分析结果在 U-Pb 谐和图上落在一致曲线上或其附近(图 2b), 形成一个相关组。因此, 129.6 ± 2.5 Ma 被解释为该煌斑脉岩的侵位年齡。

3.2 主量元素

大别山 11 条基性脉岩的主量和微量元素分析结果列于表 2, $SiO_2 = 46.13\% \sim 54.42\%$, $Mg^{\#}$ 值介于 42~72, $K_2O + Na_2O$ 在 $3.41\% \sim 7.26\%$ 范围内变化, 氧化物为总量—LOI 归一化数据, 里特曼指數显示主要为碱性系列(表 2)。TAS 岩石分类图显示绝大部分样品落入碱性区域(图 3)。

岩石随着 SiO_2 的增加, $TFeO$ 减少, 随着 $Mg^{\#}$ 值的减少, TiO_2 、 Al_2O_3 、Y 线性增加, CaO/Al_2O_3 、Cr、Ni 线性减少, $CaO-CaO/Al_2O_3$ 存在良好的线性正相关, 这些特征表明岩浆形成后存在橄榄石和单斜辉石的分离结晶作用。随着 SiO_2 的增加, TiO_2 与 P_2O_5 减少, 且 TiO_2 与 P_2O_5 之间存在正相关关系, 说明存在少量富钛矿物(如角闪石、钛铁矿)和含磷矿物(如磷灰石)的分离结晶作用。随着 SiO_2 的增加, CaO 线性减少, 但随着 $Mg^{\#}$ 值的减少, Al_2O_3 线

表 1 大别山基性脉岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果

Table 1 Zircon SHRIMP U-Pb data of basic dykes from the Dabie orogen

点号	$^{206}\text{Pb}_{\text{c}}$ (%)	U ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	Th ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	^{232}Th $/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*$ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	$^{207}\text{Pb}^*$ $/^{206}\text{Pb}^*$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}^*$ $/^{235}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*$ $/^{238}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (Ma)	$\pm 1\sigma$	γ
金寨银沙畈辉长脉岩 04-158-1														
1.1	0.29	284	806	2.93	4.91	0.0445	7.0	0.1220	7.8	0.01991	3.3	127.1	4.1	0.424
2.1	0.49	177	371	2.17	2.98	0.0452	8.8	0.1210	10.0	0.01940	4.8	123.9	5.9	0.478
3.1	0.27	384	1293	3.48	6.47	0.0507	3.1	0.1371	4.5	0.01960	3.2	125.2	4.0	0.715
4.1	0.76	186	330	1.83	3.18	0.0546	4.5	0.1501	5.7	0.01994	3.5	127.3	4.4	0.609
5.1	1.13	246	499	2.10	4.24	0.0243	38.0	0.0640	38.0	0.01924	3.4	122.9	4.1	0.089
6.1	0.22	803	3322	4.28	13.80	0.0453	4.9	0.1236	5.8	0.01982	3.1	126.5	3.9	0.541
7.1	0.19	338	1045	3.20	5.80	0.0447	8.8	0.1220	9.3	0.01985	3.2	126.7	4.0	0.345
8.1		373	1295	3.58	6.32	0.0433	11.0	0.1170	11.0	0.01965	3.2	125.5	4.0	0.283
9.1		833	2418	3.00	14.20	0.0428	4.7	0.1165	5.7	0.01974	3.1	126.0	3.9	0.551
湖北大悟东新乡闪斜煌斑岩 04-163-2														
1.1	1.44	109	155	1.46	1.94	0.0576	14.0	0.1610	15.0	0.02031	4.8	129.6	6.2	0.326
2.1	4.81	140	147	1.09	2.22	0.0380	33.0	0.0930	33.0	0.01762	3.5	112.6	4.0	0.108
3.1	0.84	322	538	1.73	5.69	0.0507	12.0	0.1430	13.0	0.02039	2.8	130.1	3.6	0.221
4.1	2.29	117	174	1.54	2.07	0.0430	25.0	0.1190	25.0	0.02008	3.2	128.2	4.1	0.129
5.1	0.65	212	309	1.50	3.64	0.0509	11.0	0.1390	11.0	0.01981	2.8	126.4	3.5	0.253
6.1	1.52	241	495	2.12	4.14	0.0403	13.0	0.1090	14.0	0.01969	2.7	125.7	3.4	0.200
7.1	2.28	272	223	0.85	4.79	0.0511	18.0	0.1410	18.0	0.02003	3.0	127.8	3.8	0.164
8.1	0.00	120	192	1.65	2.08	0.0616	4.9	0.1716	5.7	0.02020	2.9	128.9	3.7	0.505
9.1	0.80	758	1051	1.43	14.20	0.0490	4.2	0.1457	4.9	0.02159	2.6	137.7	3.5	0.526
10.1	0.44	273	406	1.53	4.87	0.0503	3.8	0.1432	4.7	0.02065	2.7	131.8	3.6	0.583

注: $^{206}\text{Pb}_{\text{c}}$ 代表普通铅; $^{206}\text{Pb}^*$ 代表放射成因铅; γ 代表误差相关系数; 采用实测的 ^{204}Pb 进行普通铅校正。

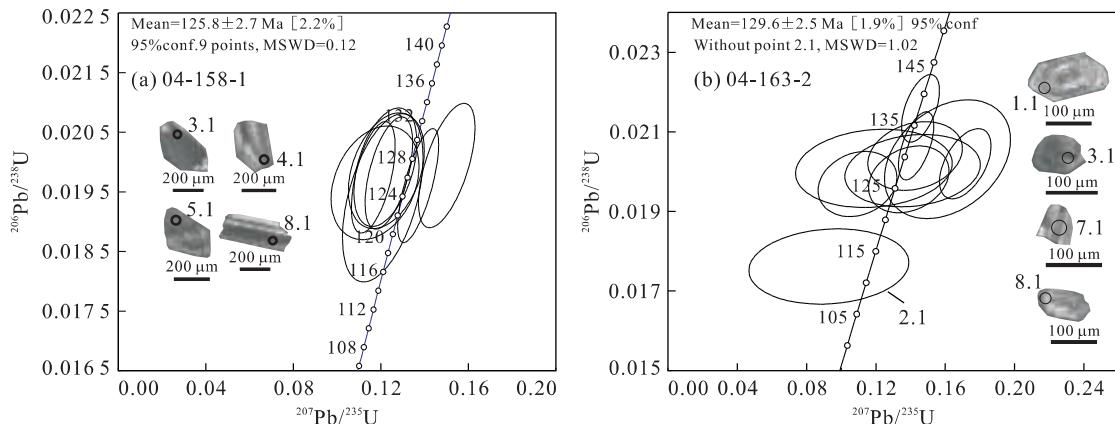


图 2 金寨银沙畈辉长脉岩(04-158-1)(a)和大悟东新乡煌斑岩(04-163-2)(b)锆石 SHRIMP U-Pb 年龄谐和图

Fig. 2 Zircon SHRIMP U-Pb concordia diagrams for Yinshafan gabbro (04-158-1) (a) and Dongxinxiang lamprophyre (04-163-2) (b)

性增加,表明不存在斜长石的分离结晶作用。部分样品中 CO_2 明显偏高,属样品中具方解石颗粒或细脉所致。

3.3 稀土元素和微量元素

大别山基性脉岩稀土元素总量变化范围较大 ($\Sigma \text{REE} (123.6 \times 10^{-6} \sim 484.1 \times 10^{-6})$);在 REE 球粒陨石标准配分图上(图 4a),所有脉岩具有相同 REE 配分模式,呈强烈的 LREE 富集、HREE 亏损右倾型特征。

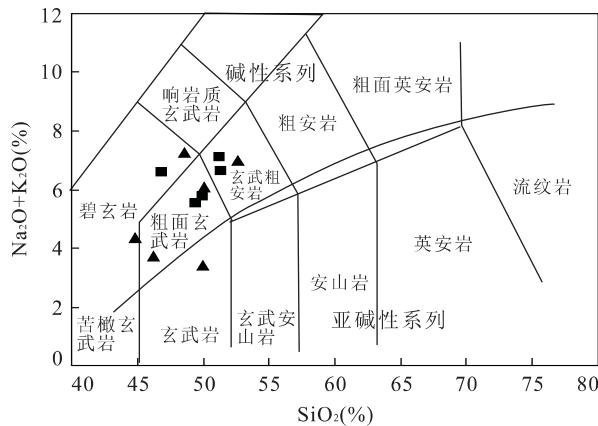
$(\text{La/Yb})_{\text{N}} = 10.2 \sim 45.8$;无或弱负 Eu 异常, $\text{Eu/Eu}^* = 0.90 \sim 1.04$ 。大别山早白垩世基性脉岩稀土配分模式总体同太行及胶北同期基性脉岩类似,呈现强烈的 LREE 富集、HREE 亏损右倾型特征,只是太行基性脉岩 LREE 更富集;但其同华南板块基性脉岩的稀土配分更平缓。

原始地幔标准化蛛网图显示(图 4b),大别山基性脉岩总体富集大离子亲石元素(LILE)和轻稀土

表 2 大别山基性脉岩主量(%)及微量元素(10^{-6})分析结果

Table 2 Major and trace elemental data of basic dykes from the Dabie orogen

样品	04-163-2	04-163-3	04-169-2	04TT-67-1	04BM-90	DB03M-2-2	03T-6	03Q-14-2	04-153-4	04-158-1	04-160-2
SiO ₂	51.39	46.91	49.46	51.30	50.05	50.02	46.28	52.64	48.59	44.89	50.16
TiO ₂	1.55	1.84	1.85	1.56	1.67	0.78	1.06	1.04	1.58	2.67	1.84
Al ₂ O ₃	14.52	14.02	14.81	15.64	15.72	10.84	14.44	14.28	16.25	14.36	14.60
Fe ₂ O ₃	2.94	3.09	3.94	2.67	3.16	2.74	1.29	2.80	4.22	7.35	3.56
FeO	5.60	5.55	5.40	5.30	6.10	6.32	7.25	5.45	6.45	6.85	5.90
TFeO	8.25	8.33	8.95	7.70	8.94	8.79	8.41	7.97	10.25	13.46	9.10
MnO	0.12	0.04	0.14	0.14	0.16	0.17	0.13	0.16	0.15	0.14	0.14
MgO	6.25	6.41	5.58	6.19	5.85	12.55	10.03	6.02	4.09	5.58	6.03
CaO	6.67	8.50	7.45	6.67	6.90	8.54	5.86	6.86	4.63	9.64	6.72
Na ₂ O	2.99	3.54	2.89	3.68	3.67	1.74	2.05	2.29	2.15	2.34	3.69
K ₂ O	3.65	3.05	2.64	3.43	2.08	1.67	1.69	4.68	5.11	2.01	2.37
P ₂ O ₅	0.80	1.35	0.76	0.89	1.02	0.42	0.51	0.51	0.90	1.49	0.76
H ₂ O ⁺	2.18	2.06	2.57	2.00	2.76	3.26	5.07	1.90	3.56	2.25	2.64
CO ₂	0.85	3.06	2.15	0.04	0.45	0.65	4.08	1.06	1.70	0.09	1.25
Total	99.51	99.42	99.64	99.51	99.59	99.70	99.74	99.69	99.38	99.66	99.66
Mg [#]	57.5	57.8	52.6	58.9	53.8	71.8	68.0	57.4	41.6	42.5	54.1
δ	5.26	11.10	4.70	6.10	4.70	1.66	4.26	5.04	9.43	10.01	5.13
Sc	17.6	17.5	17.7	18.1	20.1	20.3	29.0	25.9	17.5	38.8	18.4
V	157	194	171	149	191	159	180	180	209	414	174
Cr	222	228	211	138	148	750	980	332	20.0	3.9	242
Co	33.7	32.9	34.0	26.7	30.9	49.5	49.2	29.4	27.3	51.1	34.9
Ni	145	158	114	102	95.3	542	385	60.1	14.9	6.9	130
Ga	18.3	18.9	18.9	17.8	18.5	15.7	17.3	17.3	20.8	23.1	18.8
Rb	101	69.9	57.9	137	64.6	55.4	93.4	115	137	50.9	54.8
Sr	1 106	1 320	964	1 275	1 028	644	590	593	769	800	866
Y	23.3	22.3	20.6	23.4	26.4	14.0	17.2	19.9	26.3	33	20.2
Zr	288	309	271	267	261	123	100	167	234	148	262
Nb	21.6	25.1	20.9	27.1	24.6	11.2	8.4	9.4	12.7	10.4	20.4
Cs	1.96	2.38	1.07	3.53	0.56	1.51	2.21	0.61	2.13	1.10	0.69
Ba	2 490	2 100	1 393	2 137	1 873	679	1 016	1 247	4 341	1 033	1 162
Hf	6.35	6.66	5.91	6.64	5.25	3.55	2.96	4.39	5.96	3.93	6.05
Ta	2.89	3.56	3.21	4.33	3.48	0.93	0.56	0.91	0.80	0.67	1.21
Pb	12.9	10.0	12.2	20.1	4.7	10.7	11.3	20.2	18.9	5.0	11.8
Th	10.56	7.15	5.31	8.24	5.43	4.53	2.15	6.09	11.83	3.35	4.75
U	1.75	1.21	0.82	1.37	0.95	0.80	0.45	1.48	1.87	0.47	0.72
La	99.5	104.0	61.9	77.8	79.7	35.8	19.1	42.8	90.2	48.4	59.6
Ce	185	219	124	156	153	79.4	48.0	84.6	166	106	121
Pr	21.0	26.2	15.0	18.2	18.0	10.4	6.9	10.1	20.0	12.8	14.2
Nd	75.6	96.3	57.2	68.3	66.6	40.8	29.3	40.1	75.0	58.6	53.8
Sm	11.6	13.9	9.3	10.9	10.7	6.8	5.9	7.2	12.0	11.5	8.9
Eu	3.00	3.67	2.59	2.93	2.94	1.99	1.82	2.16	3.71	3.25	2.49
Gd	9.0	10.0	7.6	8.5	8.6	5.1	4.7	6.3	9.9	10.4	7.3
Tb	1.02	1.08	0.90	1.04	1.06	0.61	0.62	0.79	1.25	1.30	0.85
Dy	5.10	5.12	4.54	5.28	5.43	3.02	3.19	4.18	5.88	7.14	4.36
Ho	0.91	0.89	0.82	0.97	1.02	0.56	0.62	0.79	1.09	1.33	0.78
Er	2.37	2.21	2.13	2.63	2.71	1.53	1.61	2.25	2.75	3.31	1.97
Tm	0.30	0.28	0.27	0.35	0.35	0.21	0.22	0.30	0.40	0.41	0.25
Yb	1.74	1.63	1.54	2.18	2.06	1.25	1.35	1.94	2.19	2.34	1.42
Lu	0.25	0.20	0.23	0.30	0.27	0.18	0.19	0.28	0.33	0.29	0.17
Σ REE	415.84	484.08	287.53	355.28	352.03	187.66	123.56	203.80	390.76	267.37	277.09
Nb/Ta	7.48	7.05	6.51	6.26	7.06	12.01	14.91	10.35	15.96	15.49	16.84
(La/Yb) _N	40.91	45.76	28.81	25.61	27.81	20.48	10.17	15.82	29.54	14.82	30.01
Ba/Nb	115.40	83.59	66.63	78.94	76.26	60.67	121.61	132.27	341.33	99.56	56.89
La/Nb	4.61	4.14	2.96	2.87	3.24	3.19	2.29	4.54	7.09	4.67	2.92
Nb/U	12.34	20.79	25.44	19.82	25.93	13.94	18.56	6.36	6.82	21.94	28.26
Zr/Nb	13.34	12.31	12.97	9.87	10.63	11.03	11.93	17.69	18.38	14.23	12.84
Nb/Th	2.04	3.52	3.94	3.29	4.53	2.47	3.89	1.55	1.08	3.10	4.30
			Ba/Nb	La/Nb	Nb/U	Zr/Nb	Nb/Th				
N-type MORB						4.8	1.2	25.0	35.2	1.0	
Average continental crust						54.4	2.2	10.0	16.2	18.3	数据文献 Rollinson(1993)

图3 大别山基性脉岩 SiO_2 -Alk 图解(Middlemost, 1994)Fig. 3 SiO_2 -Alk diagram for basic dykes from the Dabie orogen

■煌斑脉岩; ▲辉长—辉绿脉岩

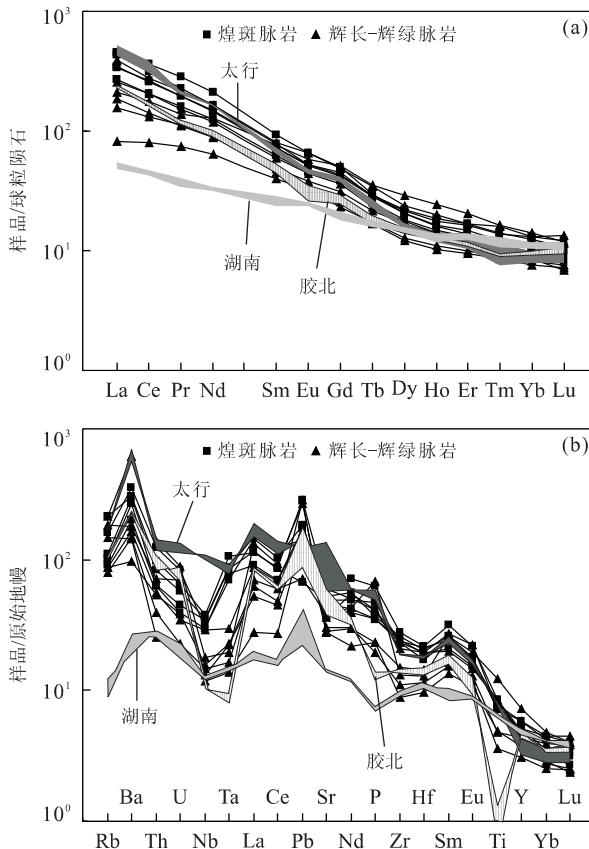


图4 大别山基性脉岩REE球粒陨石标准配分图(a)及原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized spidergrams (b) of the basic dykes from the Dabie orogen

球粒陨石标准和原始地幔标准据 Sun and McDonough(1989); 太行数据引自张勇等(2003), 脉岩年龄(120 Ma); 胶北数据引自刘燊等(2005), 脉岩年龄(129.1 Ma, 121 Ma); 湖南数据引自 Wang et al. (2003), 基性岩年龄(124.5 Ma, 127.6 Ma)

元素(LREE), 亏损高场强元素(HFSE)(Nb, Zr, Hf, Ti), 类似于岛弧火山岩的原始地幔标准化不相容元素配分模式。大别山早白垩世基性脉岩的特征同胶北同期基性脉岩完全类似, 太行基性脉岩的 Nb 亏损程度远远低于其他脉岩, 湖南的基性脉岩同其余三者有较大差别。以上特征表明, 大别山早白垩世基性脉岩可能同胶北脉岩具类似的源区特征, 源区总体类似于华北岩石圈地幔, 而同华南却有较大差异。

3.4 Sr-Nd 同位素地球化学

样品的 Sr-Nd 同位素组成见表 3, I_{Sr} 在 0.7060~0.7104 之间, 平均为 0.7071; 并具有显著偏低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-12.04~-18.84)值, 平均 -14.40; 除个别样品外, 同大别地区出露的镁铁质侵入岩的同位素特征完全类似(李曙光等, 1998; Jahn et al., 1999; Li and Yang, 2003)。Nd 模式年龄 $T_{\text{DM}}(\text{Ga})$ 值 1.60~2.62, 平均 1.86 Ga。

4 讨论

4.1 地壳混染程度

基性脉岩低的 SiO_2 (46.13%~54.42%)表明其来源于地幔, 但大离子亲石元素和高场强元素 Ba/Nb 比值及高场强元素之间的 Zr/Nb、La/Nb、Nb/U 和 Nb/Th(表 2)均显示地壳岩石的特征, 低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-12.04~-18.84)值也强烈显示地壳岩石的特征。造成这种现象有两种可能: 一是由岩浆的源区富集所致, 即岩浆源区存在有因俯冲或其他机制进入地幔的陆壳物质; 另一是岩浆上升过程中遭受了强烈的地壳物质的混染。如属于后者, 则与以下现象矛盾: 首先地壳混染将使岩浆的 SiO_2 增高、 MgO 值显著降低, 但各类脉岩 SiO_2 - MgO 不相关, 说明陆壳混染影响不大; 其次各类脉岩微量元素、稀土元素和同位素含量以相对均一或变化不大为特征, 也表明岩浆上升过程中地壳混染作用不大; 在同位素特征上, 地壳物质加入, 岩石 SiO_2 增加, I_{Sr} 比值将增高, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值会降低, 各类基性脉岩在 SiO_2 - I_{Sr} (图 5a) 上和在 SiO_2 - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (图 5b) 上不显示相关性, 排除了岩浆上升过程中陆壳物质混染。

4.2 源区特征

稀土及微量元素特征显示, 大别基性脉岩源区的地球化学特征与华北陆块类似, 特别与胶北类似, 但与华南陆块却有较大差异。中国东部华北和华南

表3 大别山基性脉岩 Sr、Nd 同位素分析结果

Table 3 The Sr, Nd composition of basic dykes from the Dabie orogen

样品号	Sm(10^{-6})	Nd(10^{-6})	Rb(10^{-6})	Sr(10^{-6})	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$
04-163-2	11.603	75.549	101.176	1105.52	0.096	0.511 889
04-169-2	9.309	57.161	57.905	964.24	0.104 7	0.511 881
04TT-67-1	10.876	68.272	137.197	1275.34	0.098 2	0.511 85
04BM-90	10.714	66.606	64.558	1028.43	0.098 8	0.511 888
DB03M-2-2	6.779	40.844	55.414	644.296	0.098 1	0.511 937
03T-6	5.939	29.273	93.402	590.266	0.101 8	0.511 735
03Q-14-2	7.204	40.115	115.438	592.906	0.107 6	0.511 806
04-153-4	12.03	75.028	137.332	768.719	0.103 8	0.511 701
04-158-1	11.459	58.644	50.858	799.563	0.124 5	0.511 611
04-160-2	8.859	53.814	54.803	865.812	0.104 3	0.511 91
样品号	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$T_{\text{DM}}(\text{Ga})$	
04-163-2	0.272 3	0.707 39	0.706 89	-12.95	1.63	
04-169-2	0.190 7	0.707 13	0.706 79	-13.24	1.77	
04TT-67-1	0.350 5	0.707 49	0.706 86	-13.74	1.71	
04BM-90	0.188 7	0.707 82	0.707 48	-13.01	1.67	
DB03M-2-2	0.242 6	0.705 98	0.705 54	-12.04	1.60	
03T-6	0.243	0.707 51	0.707 07	-16.05	1.92	
03Q-14-2	0.539 4	0.707 92	0.706 95	-14.76	1.92	
04-153-4	0.538 3	0.710 36	0.709 39	-16.74	2.00	
04-158-1	0.191	0.707 956	0.707 61	-18.84	2.62	
04-160-2	0.200 3	0.707 36	0.707 00	-12.67	1.72	

注: $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 计算参数: $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.1967$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512638$, $t = 130 \text{ Ma}$.

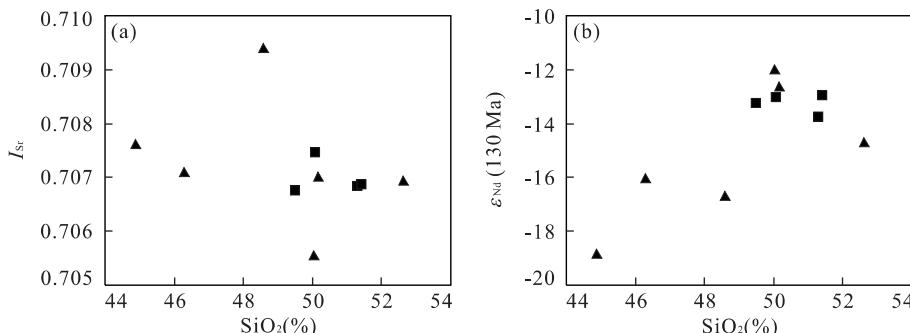
图5 大别山基性脉岩 SiO_2 - I_{Sr} (a) 和 SiO_2 - ϵ_{Nd} (130 Ma) (b) 图解

Fig. 5 SiO_2 - I_{Sr} (a) and SiO_2 - ϵ_{Nd} (130 Ma) (b) diagrams of basic dykes from the Dabie orogen

■煌斑脉岩; ▲辉长—辉绿脉岩

陆块的中生代镁铁质岩浆岩 Nd 同位素存在显著差异: 华北陆块中生代幔源岩浆岩石 ϵ_{Nd} 可低至 $-15 \sim -21$, 华南陆块 $\epsilon_{\text{Nd}} > -10$ (Li and Yang, 2003), 整个大别基性脉岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 $-12.04 \sim -18.84$, 类似于华北陆块富集地幔特征。大别山早白垩世基性脉岩 $I_{\text{Sr}}-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 同位素图解(图6)显示, 大别山早白垩世基性脉岩 Sr-Nd 同位素特征与华南同期脉岩有明显差异, 与 Wang *et al.* (2005) 研究的北淮阳南大别基性脉岩数据一致, 太行鲁北基性脉岩与鲁中基性岩有明显差别, 大别早白垩世基性脉岩更类似于苏鲁—胶北早白垩世煌斑岩的同位素特征。

大别山北淮阳柳林—王母观辉长岩 ($611 \pm 13 \text{ Ma}$) 正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = 1.9 \sim 3.0$ (张旗等, 1995; 陈玲等, 2006), 大别山北麓的奥陶纪马畈闪长质杂岩体 ($462.7 \pm 1.4 \text{ Ma}$) 中从镁铁质包体到闪长岩和花岗岩类 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 介于 $4.3 \sim -1.8$ (马昌前等, 2004), 表明当时的地幔皆为亏损地幔。自三叠纪扬子与华北板块碰撞造山后, 大别山地区下部的岩石圈地幔发生了明显的改变, 至早白垩世, 由于受整个中国东部岩石圈拉张事件的影响, 大别地区出露了数量可观的镁铁—超镁铁侵入体, 无论岩体还是脉岩, 都呈现明显的同位素富集特征 ($\epsilon_{\text{Nd}}(t) < -12$), 源区为富集地

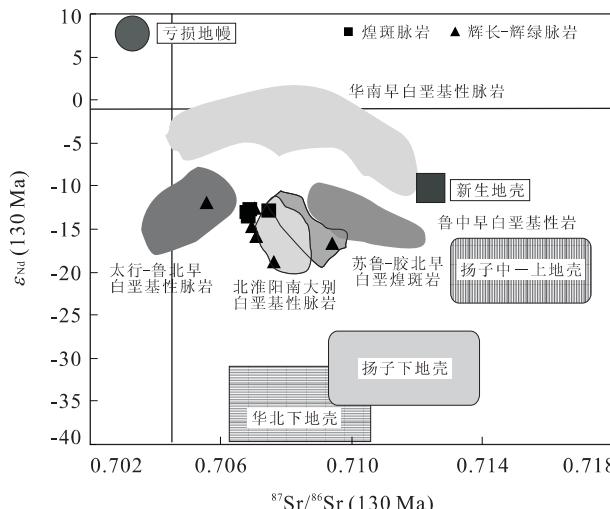


Fig. 6 Initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ versus $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ ($t=130 \text{ Ma}$) diagram for basic dykes from the Dabie orogen

华北下地壳和扬子中上地壳同位素变化范围引自 Jahn *et al.* (1999); 扬子下地壳(崆岭群 TTG)同位素变化范围引自 Gao *et al.* (1999); 亏损地幔和年轻地壳引自 Sun and McDonough (1989); 太行-鲁北基性脉岩(岩)数据引自邵济安和张履桥 (2002)、Ying *et al.* (2006); 华南基性脉岩数据引自谢桂青等 (2001)、王岳军等 (2007)、Zhao *et al.* (2007a); 鲁中基性岩引自 Ying *et al.* (2006); 苏鲁-胶北基性脉岩数据引自刘燊等 (2005); 北淮阳南大别基性脉岩数据引自 Wang *et al.* (2005)

幔。大别山南坡及扬子克拉通北缘晚白垩世东湖群红色砂岩中广泛出露玄武岩,如黄陂和新洲, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 分别为 2.05 和 3.9(周文戈, 1996), 表明源区已属亏损地幔, 大别地区的地幔经历了弱亏损—富集—亏损的演化, 地幔演化特征同华北东南缘类似(张宏福等, 2005)。

早白垩世苏鲁—大别地区的岩石圈地幔为富集岩石圈地幔已基本取得共识, 但对具体岩石圈地幔的富集过程仍存在争议。对北大别地区的超镁铁—镁铁侵入岩的来源, 李曙光等(1998)认为是含残留俯冲陆壳的富集地幔熔融, Jahn *et al.* (1999)强调是俯冲陆壳与亏损地幔混合, Wang *et al.* (2005)认为是俯冲陆壳与华北陆块岩石圈地幔的混合, Zhao *et al.* (2005)强调为俯冲的扬子陆块富集岩石圈地幔的部分熔融, Zhang *et al.* (2002)通过研究苏鲁和鲁西南地区镁铁质岩认为拆离/断离俯冲板片熔体交代为形成富集地幔重要机制。针对早白垩世大别基性脉岩, 在图 7a 上, 我们发现暗色脉岩所有样品都远离由原始地幔、MORB、OIB 等构成的亏损地幔

区域, 样品点均投影在岛弧火山岩区, 与碎屑沉积物及大陆地壳的分布区较接近, 大多落入崆岭杂岩区, 同扬子中下地壳的平均值比较接近, 反映了相对 HFSE 富集、LILE 和 LREE 的物质参与了岩浆的形成过程, 有扬子中下地壳物质的加入。在图 7b 上, 显示富集岩石圈地幔可能来自软流圈地幔和中下地壳源区混合, 上地壳物质的加入不明显, 结合 Sr-Nd 同位素较大的变化范围, 表明源区地幔的不均一性, 可能有部分软流圈地幔物质的加入。

大别造山带基性岩具有与华北板块基性岩相似的地球化学特征, 表明大别基性脉岩源区的富集地幔可能来自与扬子俯冲中下陆壳和华北岩石圈地幔的混合, 俯冲陆壳对原有岩石圈弱亏损的岩石圈进行改造, 致使出现高度富集 LILE 和 LREE 的造山带地幔, 大别山富集地幔的形成主要受自晚三叠世以来扬子板块向华北板块俯冲、碰撞影响。这些加厚的岩石圈和经改造的富集岩石圈地幔在晚侏罗世, 由于受整个太平洋构造域拉张事件的影响, 出现地幔物质的上涌和岩石圈的减薄, 到 130 Ma 左右, 开始出现大量基性脉岩及中酸性岩体, 标志着岩石圈大规模拉张事件的开始, 大别地区经历了强烈的壳幔置换、岩石圈减薄, 最终导致软流圈地幔成为深部活动的主导, 出现 80 Ma 以后的亏损地幔特征。结合大别造山带基性岩具有与华北板块基性岩相同的 Sr、Nd 同位素特征, 大别地区经历了晚中生代以来的扬子俯冲—碰撞作用, 可以认为大别山富集地幔的形成主要受自晚三叠世以来扬子板块向华北板块俯冲、碰撞影响。

4.3 构造体制意义

本区基性脉岩形成于早白垩世(SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 125 Ma、129 Ma), 大多呈 NEE 走向, 这同整个中国大陆晚燕山期 NE 向构造应力场最大主应力方向一致(万天丰, 2004)。图 8a 显示煌斑脉岩主要位于板内富集型地幔玄武岩区, 辉长—辉绿脉岩主要位于活动大陆边缘玄武岩区; 图 8b 显示脉岩主要在板内岩区, 少部分出现在板内拉斑玄武岩区, 部分有火山弧玄武岩特征。结合脉岩具有大陆边缘弧的地化特征, 暗示辉长—辉绿脉岩的地幔源区可能受到过俯冲带流体的交代。

早白垩世大别山地区不仅出现数量可观的基性侵入岩、火山岩, 而且出现更大规模的花岗岩, 这些基性岩和中酸性岩在同位素年龄上近于同时, 地球化学特征上都显示源区强烈富集的特征, 表明是一

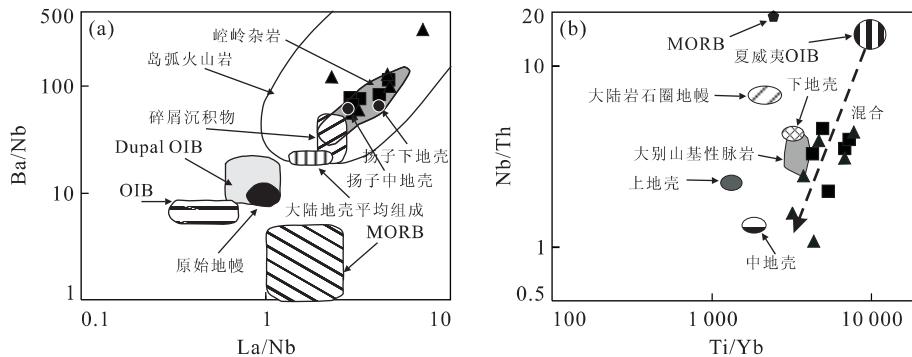


图 7 大别山基性脉岩 La/Nb - Ba/Nb (a) 和 Ti/Yb - Nb/Th (b) 相关(李献华等, 2002)

Fig. 7 Relations of $\text{Ba}-\text{Nb}$ vs. $\text{La}-\text{Nb}$ (a) and $\text{Ti}-\text{Yb}$ vs. $\text{Nb}-\text{Th}$ (b) for basic dykes from the Dabie orogen

■煌斑脉岩;▲辉长—辉绿脉岩;a 图中:原始地幔据 Sun and McDonough(1989);大陆地壳据 Taylor and McLennan(1985)和 Condie(1993);碎屑沉积物据 Condie(1993);MORB、OIB 和 Dupal OIB 据 Le Roux(1986);岛弧火山岩据 Jahn and Zhang(1984);岩岭杂岩、扬子中地壳和扬子下地壳据 Gao *et al.* (1998, 1999);b 图中:夏威夷 OIB 数据引自 Feigenson *et al.* (1996) 和 Hofmann and Jochum(1996);中、下地壳数据引自 Rudnick and Fountain(1995);大陆岩石圈地幔引自 McDonough(1990);上地壳据 Taylor and McLennan(1985);大别山基性脉岩引自 Wang *et al.* (2005)

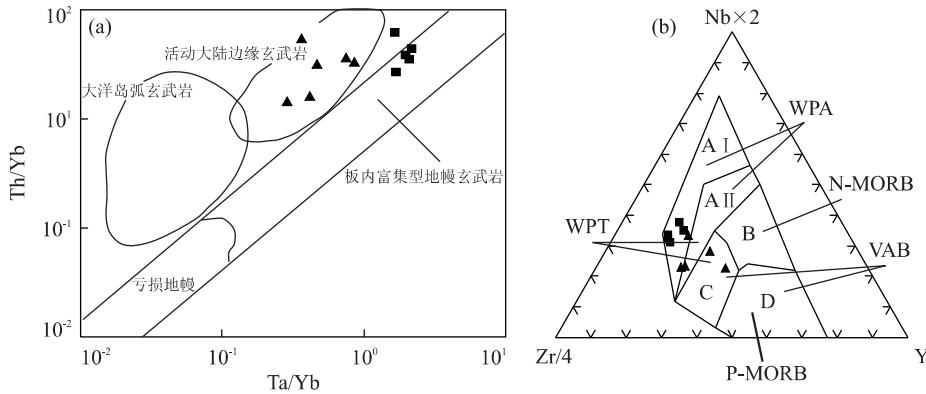


图 8 大别早白垩世基性脉岩大地构造环境判别图

Fig. 8 Tectonic discriminates diagrams for basic dykes from the Dabie orogen

■煌斑脉岩;▲辉长—辉绿脉岩;a 图据 Pearce(1982);b 图据 Meschede(1986);WPA. 板内碱性玄武岩;WPT. 板内拉斑玄武岩;VAB. 火山弧玄武岩;P-MORB(P 型富集 MORB)和 N-MORB(N 型亏损 MORB)

期明显的壳幔置换事件,岩浆事件是从深部地幔部分熔融开始,随后很快扩展为大规模地壳部分熔融。岩浆事件的热动力来自地幔深部,岩石圈经历了伸展—拉张和减薄作用。

大别山地区目前报道较老的燕山期岩浆活动有大别核部的云峰顶岩体(143 ± 3 Ma)和鹅公包岩体(142 ± 3 Ma),地球化学特征显示具有高 Sr/Y 比值特征(Wang *et al.*, 2007),反映当时大别山地区存在加厚地壳。马昌前等(2007)研究发现,大别山地区高 Sr/Y 比值的花岗岩类一般都大于 130 Ma,在此之后高 Sr/Y 比值的花岗岩类很少存在,主要为富碱性岩浆岩、基性岩类。这与基性脉岩主要出现在 130 Ma 之后的现象一致,表明 130 Ma 左右应是大别地区岩石圈大规模拉张事件的开始,自此拉开了

整个大别山地区大规模岩浆事件的序幕。

大别山早白垩世岩浆岩因产于碰撞造山后,很容易联系到为造山循环的一个过程,但越来越多的证据表明,大别山地区晚中生代大规模岩浆可能同华北—扬子的陆—陆碰撞造山旋回无关。一方面由于其同碰撞造山时间相隔过长;另一方面同时期在整个中国东部都记录到 130~120 Ma 左右明显的岩石圈伸展事件(Guo *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2004; Wu *et al.*, 2005),整个中国东部大量能源盆地的形成、大型矿床富集、大量火山活动等都在这一时期出现,表明这是一期全区大规模岩浆事件。大别山地区大规模类型复杂的岩浆事件,应属于整个中国东部岩石圈伸展事件的一部分,岩浆地球化学的多样性受其原有源区特征差异的控制。

5 结论

(1) 北淮阳金寨银沙畈辉长脉岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 125.8 ± 2.7 Ma, 西大别大悟县东新乡闪斜煌斑脉岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 为 129.6 ± 2.5 Ma, 皆为早白垩世, 与大别超镁铁—镁铁质岩体同期, 表明大别山地区大规模拉张事件开始于 130 Ma 左右。

(2) 地球化学和同位素特征显示基性脉岩在上升过程中没有受到明显的地壳混染, 其源区主要来自富集岩石圈地幔, 富集岩石圈地幔为扬子俯冲中下陆壳和华北岩石圈地幔混合的产物, 可能有部分软流圈物质的加入。

(3) 大别山地区不同地块晚白垩世基性脉岩具相同的地球化学特征, 来源于富集岩石圈地幔的部分熔融, 类似于华北东南部富集岩石圈地幔特征。整个中国东部不同区块相同时期出现的基性脉岩, 其地球化学特征差异更多的是受其原有源区特征的控制。

(4) 大别山基性脉岩同大别山中酸性岩浆大爆发近于同期, 也同整个中国东部晚中生代岩浆活动同时, 整体处于伸展环境, 都属于整个中国东部晚中生代岩石圈伸展减薄事件的一部分。

致谢: 锆石 SHRIMP 年代学测试得到北京离子探针中心万渝生研究员、陶华工程师的指导和帮助, 采样过程中得到续海金博士的帮助, 匿名审稿人的建议给本文的完善以很大帮助, 在此一并致谢!

References

- Chen, F., Hegner, E., Todt, W., 2000. Zircon ages and Nd isotopic and chemical compositions of orthogneisses from the Black Forest, Germany: evidence for a Cambrian magmatic arc. *International Journal of Earth Sciences*, 88(4): 791–802. doi: 10.1007/s005310050306
- Chen, F., Siebel, W., Satir, M., et al., 2002. Geochronology of the Karadere basement (NW Turkey) and implications for the geological evolution of the Istanbul zone. *International Journal of Earth Sciences*, 91(3): 469–481. doi: 10.1007/s00531-001-0239-6
- Chen, L., Ma, C. Q., She, Z. B., et al., 2006. The Liulin gabbro in the Beihuaiyang tectonic belt of the Dabie orogen: a witness of the Late Neoproterozoic rifting event. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(4): 578–584 (in Chinese with English abstract).
- Condie, K., 1993. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chemical Geology*, 104(1–4): 1–37. doi: 10.1016/0009-2541(93)90140-E
- Feigenson, M. D., Patino, L. C., Carr, M. J., 1996. Constraints on partial melting imposed by rare earth element variations in Manna Kea basalts. *Journal of Geophysical Research*, 101: 11815–11829. doi: 10.1029/95JB03847
- Gao, S., Ling, W. L., Qiu, Y. M., 1999. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(13–14): 2071–2088. doi: 10.1016/S0016-7037(99)00153-2
- Gao, S., Luo, T. C., Zhang, B. R., 1998. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(11): 1959–1975. doi: 10.1016/S0016-7037(98)00121-5
- Guo, F., Fan, W. M., Wang, Y. J., et al., 2004. Origin of Early Cretaceous calc-alkaline lamprophyres from the Sulu orogen in eastern China: implications for enrichment processes beneath continental collisional belt. *Lithos*, 78(3): 291–305. doi: 10.1016/j.lithos.2004.05.001
- Halls, H. C., Campal, N., Davis, D. W., et al., 2001. Magnetic studies and U-Pb geochronology of the Uruguayan dyke swarm, Rio de la Plata craton, Uruguay: paleomagnetic and economic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 14(4): 349–361. doi: 10.1016/S0895-9811(01)00031-1
- Halls, H. C., McArdle, N. J., Gratton, M. N., 2004. Microwave Paleointensities from dyke chilled margins: a way to obtain long-term variations in geodynamic intensity for the last three billion years. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 147(2–3): 183–195. doi: 10.1016/j.pepi.2004.03.013
- Hofmann, A. W., Jochum, K. P., 1996. Source characteristics derived from very incompatible trace elements in Mauna Loa and Mauna Kea basalts, Hawaii Scientific Drilling Project. *Journal of Geophysical Research*, 101: 11831–11839. doi: 10.1029/95JB03701
- Jahn, B. M., Wu, F. Y., Lo, C. H., 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, Central China. *Chemical Geology*,

- 157(1—2):119—146. doi:10.1016/S0009—2541(98)00197—1
- Jahn, B. M., Zhang, Z. Q., 1984. Archean granulite gneisses from eastern Hebei Province, China: rare earth geochemistry and tectonic implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 85(3):224—243. doi:10.1007/BF00378102
- Le Roux, A. P., 1986. Geochemical correlation between southern African kimberlites and South Atlantic hotspots. *Nature*, 324: 243—245. doi:10.1038/324243a0
- Li, S. G., Hong, J. A., Li, H. M., et al., 1999. U-Pb zircon ages of the pyroxenite-gabbro intrusions in Dabie mountains and their geological implications. *Geological Journal of China Universities*, 5(3):351—355 (in Chinese).
- Li, S. G., Nie, Y. H., Hart, S. R., et al., 1998. Upper mantle-deep subducted continental crust interaction: Sr and Nd isotopic constraints on the syn-collisional mafic to ultramafic intrusions in the northern Dabieshan, China. *Science in China (Series D)*, 28(1):18—22 (in Chinese).
- Li, S. G., Yang, W., 2003. Decoupling of surface and subsurface sutures in the Dabie orogen and a continent-collisional lithospheric-wedging model: Sr-Nd-Pb isotopic evidences of Mesozoic igneous rocks in eastern China. *Chinese Science Bulletin*, 48(8):831—838. doi:10.1360/01wd0554
- Li, X. H., Hu, R. Z., Rao, B., 1997. Geochronology and geochemistry of Cretaceous mafic dikes from northern Guangdong, SE China. *Geochimica*, 26(2):14—31 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., Zhou, H. W., Li, Z. X., et al., 2002. Petrogenesis of Neoproterozoic bimodal volcanics in western Sichuan and its tectonic implications: geochemical and Sm-Nd isotopic constraints. *Chinese Journal of Geology*, 37(3):264—276 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S., Hu, R. Z., Zhao, J. H., et al., 2005. Geochemical characteristics and petrogenetic investigation of the Late Mesozoic lamprophyres of Jiaobei, Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3):947—958 (in Chinese with English abstract).
- Ma, C. Q., Ehlers, C., Xu, C. H., 2000. The roots of the Dabieshan ultrahigh-pressure metamorphic terrane: constraints from geochemistry and Nd-Sr isotope systematics. *Precambrian Research*, 102(3):279—301. doi:10.1016/S0301—9268(00)00069—3
- Ma, C. Q., Li, Z. C., Ehlers, C., 1998. A post-collisional magmatic plumbing system: Mesozoic granitoid plutons from the Dabieshan high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic zone, East-Central China. *Lithos*, 45(1—4):431—456. doi:10.1016/S0024—4937(98)00043—7
- Ma, C. Q., Ming, H. L., Yang, K. G., 2004. An Ordovician magmatic arc at the northern foot of Dabie mountains: evidence from geochronology and geochemistry of intrusive rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3):393—402 (in Chinese with English abstract).
- Ma, C. Q., Zhang, C., She, Z. B., et al., 2007. The Dabie mountains and its southeast Yanshanian magmatic activity: magmatic arc migration and extensional collapse. In: 2007 National Symposium on Petrology and Geodynamics and Chemical Geodynamics. China University of Geosciences Press, Wuhan, 106—109 (in Chinese).
- McDonough, W. F., 1990. Constraints on the composition of the continental lithospheric mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 101(1):1—18. doi:10.1016/0012—821X(90)90119—I
- Meschede, M., 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chemical Geology*, 56(3—4):207—218. doi:10.1016/0009—2541(86)90004—5
- Middlemost, E. A. K., 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth Science Review*, 37(3—4):215—224. doi:10.1016/0012—8252(94)90029—9
- Pearce, J. A., 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe, R. S., eds., *Orogenic andesites and related rocks*, Wiley and Sons, New York, 525—548.
- Rollinson, H., 1993. Using Geochemical data: evalution, presentaion, interpretation. Longman Scientific and Technical Press, New York, 144.
- Rudnick, R. L., Fountain, D. M., 1995. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. *Reviews of Geophysics*, 33: 267—309. doi:10.1029/95RG01302
- Shao, J. A., Zhang, L. Q., 2002. Mesozoic dyke swarms in the north of North China. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3):312—318 (in Chinese with English abstract).
- Song, B., Zhang, Y. H., Wan, Y. S., et al., 2002. Mount malcing and procedure of the SHRIMP dating. *Geological Review*, 48(Suppl.): 26—30 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts, implications for mantle

- composition and processes. Geological Society, London, 313—345. doi:10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The continental crust: its composition and evolution—an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks. Blackwell Press, Oxford, 1—2.
- Wan, T. F., 2004. China tectonics outlines. Geological Publishing House, Beijing, 152—162 (in Chinese).
- Wang, Q., Wyman, D. A., Xu, J. F., et al., 2007. Early Cretaceous adakitic granites in the northern Dabie complex, Central China: implication for partial melting and delamination of thickened lower crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(10):2609—2636. doi:10.1016/j.gca.2007.03.008
- Wang, Y. J., Fan, W. M., Peng, T. P., et al., 2003. Geochemistry of Mesozoic mafic rocks around the Chenzhou-Linwu fault in South China: implication for the lithospheric boundary between the Yangtze and the Cathaysia blocks. *International Geology Review*, 45 (3):263—286. doi:10.2747/0020-6814.45.3.263
- Wang, Y. J., Fan, W. M., Peng, T. P., et al., 2005. Nature of the Mesozoic lithospheric mantle and tectonic decoupling beneath the Dabie orogen, Central China: Evidence from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology, elemental and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of Early Cretaceous mafic igneous rocks. *Chemical Geology*, 220(3—4):165—189. doi:10.1016/j.chemgeo.2005.02.020
- Wang, Y. J., Peng, T. P., Fan, W. M., et al., 2007. Early Proterozoic mafic dikes in the North China craton and their tectonic implications. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 26(1):1—9 (in Chinese with English abstract).
- Williams, I. S., 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben, M. A., Shanks III, W. C., Ridley, W. I., eds., Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes. *Review in Economic Geology*, 7:1—35.
- Wu, F. Y., Lin, J. Q., Simon, A. W., et al., 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233 (1—2): 103—119. doi: 10.1016/j.epsl.2005.02.019
- Xie, G. Q., Peng, J. T., Hu, R. Z., et al., 2001. Geochemical characteristics of lamprophyres in the Xikuangshan antimony ore deposits, Hunan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4):629—636 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H. J., Ma, C. Q., Ye, K., 2007. Early Cretaceous granitoids and their implications for the collapse of the Dabie orogen, eastern China: SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemistry. *Chemical Geology*, 240 (3—4): 238—259. doi:10.1016/j.chemgeo.2007.02.018
- Xu, Y. G., Huang, X. L., Ma, J. L., et al., 2004. Crust-mantle interaction during the tectono-thermal reactivation of the North China craton: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb chronology and geochemistry of Mesozoic plutons from western Shandong. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 147 (6): 750—767. doi: 10.1007/s00410-004-0594-y
- Ying, J. F., Zhou, X. H., Zhang, H. F., 2006. The geochemical variations of Mid-Cretaceous lavas across western Shandong Province, China and their tectonic implications. *International Journal of Earth Sciences*, 95(1): 68—79. doi:10.1007/s00531-005-0509-9
- Zhang, C. L., Zhou, D. W., Liu, Y. Y., 1999. Geochemistry of basic dykes in Wudangshan block and their tectonic significance. *Geochimica*, 28(2): 126—135 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. F., Sun, M., Zhou, X. H., 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China craton: evidence from major, trace element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144 (2): 241—253. doi: 10.1007/s00410-002-0395-0
- Zhang, H. F., Zhou, X. H., Fan, W. M., et al., 2005. Nature, composition, enrichment processes and its mechanism of the Mesozoic lithospheric mantle beneath the southeastern North China craton. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (4): 1271—1280 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Ma, W. P., Jin, W. J., et al., 1995. Geochemistry and tectonic significance of post-tectonic gabbro from Wangmuguan of Xinxiang county, Henan Province. *Geochimica*, 24(4):341—350 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Chen, B., Shao, J. A., et al., 2003. Geochemistry and origin of Late Mesozoic lamprophyre dykes in Taihang mountains, North China. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(1):29—33 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J. H., Hu, R. Z., Zhou, M. F., et al., 2007a. Elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of Mesozoic mafic intrusions in southern Fujian Province, SE China; implications for lithospheric mantle evolution. *Geological Magazine*, 144: 937—952. doi: 10.1017/S0016756807003834
- Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., Wei, C. S., et al., 2005. Zircon U-

- Pb age, element and C-O isotope geochemistry of post collisional mafic-ultramafic rocks from the Dabie orogen in East-Central China. *Lithos*, 83(1—2): 1—28. doi: 10.1016/j.lithos. 2004. 12. 014
- Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., Wei, C. S., et al., 2007b. Post-collisional granitoids from the Dabie orogen in China: zircon U-Pb age, element and O isotope evidence for recycling of subducted continental crust. *Lithos*, 93(3—4): 248—272. doi: 10.1016/j.lithos. 2006. 03. 067
- Zhou, W. G., 1996. Qinling-Dabie orogenic belt after the collision tectonic development and geochemical study of regional magmatism (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan, 64 (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈玲, 马昌前, 余振兵, 等, 2006. 大别山北淮阳构造带柳林辉长岩: 新元古代晚期裂解事件的记录. 地球科学——中国地质大学学报, 31(4): 578—584.
- 李献华, 胡瑞忠, 饶冰, 1997. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学. 地球化学, 26(2): 14—31.
- 李献华, 周汉文, 李正祥, 等, 2002. 川西新元古代双峰式火山岩成因的微量元素和 Sm-Nd 同位素制约及其大地构造意义. 地质科学, 37(3): 264—276.
- 李曙光, 洪吉安, 李惠民, 等, 1999. 大别山辉石岩—辉长岩体的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 高校地质学报, 5(3): 351—355.
- 李曙光, 聂永红, Hart, S. R., 等, 1998. 俯冲陆壳与上地幔的相互作用—II. 大别山同碰撞镁铁—超镁铁岩的 Sr, Nd 同位素地球化学. 中国科学(D辑), 28(1): 18—22.
- 刘燊, 胡瑞忠, 赵军红, 等, 2005. 胶北晚中生代煌斑岩的岩石地球化学特征及其成因研究. 岩石学报, 21(3): 947—958.
- 马昌前, 明厚利, 杨坤光, 2004. 大别山北麓的奥陶纪岩浆弧:

- 侵入岩年代学和地球化学证据. 岩石学报, 20(3): 393—402.
- 马昌前, 张超, 余振兵, 等, 2007. 大别山及其东南燕山期岩浆活动: 岩浆弧迁移与伸展塌陷. 2007 全国岩石学与地球动力学暨化学地球动力学研讨会论文集. 武汉: 中国地质大学, 106—109.
- 邵济安, 张履桥, 2002. 华北北部中生代岩墙群. 岩石学报, 18(3): 312—318.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等, 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. 地质论评, 48(增刊): 26—30.
- 万天丰, 2004. 中国大地构造学纲要. 北京: 地质出版社, 152—162.
- 王岳军, 彭头平, 范蔚茗, 等, 2007. 华北陆块早元古代基性岩墙群及其构造意义. 矿物岩石地球化学通报, 26(1): 1—9.
- 谢桂青, 彭建堂, 胡瑞忠, 等, 2001. 湖南锡矿山锑矿矿区煌斑岩的地球化学特征. 岩石学报, 17(4): 629—636.
- 张成立, 周鼎武, 刘颖宇, 1999. 武当山地块基性岩墙群地球化学研究及其大地构造意义. 地球化学, 28(2): 126—135.
- 张宏福, 周新华, 范蔚茗, 等, 2005. 华北东南部中生代岩石圈地幔性质、组成、富集过程及其形成机理. 岩石学报, 21(4): 1271—1280.
- 张旗, 马文璞, 金唯俊, 等, 1995. 一个造山后的辉长岩——河南新县王母观岩体的地球化学特征. 地球化学, 24(4): 341—350.
- 张勇, 陈斌, 邵济安, 等, 2003. 华北太行晚中生代煌斑岩地球化学特征及成因探讨. 岩石矿物学杂志, 22(1): 29—33.
- 周文戈, 1996. 秦岭—大别造山带碰撞后构造发展—区域岩浆作用地球化学研究(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学, 64.