

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*

马昌前 明厚利 杨坤光

MA ChangQian, MING HouLi and YANG KunGuang

中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074

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

2003-04-22 收稿, 2004-04-04 改回.

Ma CQ, Ming HL and Yang KG. 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

Abstract With the methods of single grain zircon U-Pb and hornblende $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ dating, magmatic zircon ages of (463.5 ± 3.4) Ma and (458.6 ± 6.7) Ma and a hornblende $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ plateau age of (462.7 ± 1.4) Ma are yielded in the quartz diorite of the Mafan dioritic complex at the northern foot of Dabie Mountains. Mafic microgranular enclaves (MME), and dioritic and granitoid rocks in the complex are characterized by low Nb/Zr and moderate-high Ba/Th ratios, high ϵ_{Nd} (460 Ma) values between 4.3 and -1.8, a positive correlation between ϵ_{Nd} (460 Ma) and $\text{Mg}^\#$ values of rocks, and a negative correlation between ϵ_{Nd} (460 Ma) values and SiO_2 and Nb contents, implying an interaction of depleted mantle-derived magma and fluid from subducted slab, as well as crustal AFC (fractional crystallization paired with assimilation). However, the depletion of high field strength elements such as Nb in MME with ϵ_{Nd} (460 Ma) of 1.9 is chemical characteristics inherited from the mantle source, rather than the result of crustal contamination, indicating that mafic magma has formed in a subduction-related setting. It is suggested that there has been an once developed Ordovician magmatic arc, which joins the north Qinling arc magmatic zone to the west. Emplacement ages of subduction-type intrusive rocks in Central China orogen show a tendency to become younger from Mafan complex at the northern foot of Dabie Mountains in the east to Buqingshan tonalite of Kunlun Mountain in the west, implying that the Proto-Tethyan Qinling ocean had been closed gradually from east to west in the course of slab subduction under the active southern continental margin of the North China Block.

Key words Zircon U-Pb age, Paleozoic era diorite, Magmatic arc, Dabie orogenic belt

摘要 采用颗粒锆石 U-Pb 和角闪石的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 定年方法, 测得大别山北麓马吸闪长质杂岩体中石英闪长岩的结晶锆石年龄分别为 (463.5 ± 3.4) 和 (458.6 ± 6.7) Ma, 角闪石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 (462.7 ± 1.4) Ma。从镁铁质包体到闪长岩和花岗岩类, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 介于 4.3 ~ 1.8 之间, 且随着 $\text{Mg}^\#$ 值的减小和 SiO_2 及 Nb 含量增高, 岩石的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值降低, 结合低 Nb/Zr 比值和中等 - 高的 Ba/Th 比值等特点, 认为有关岩石的形成与幔源岩浆受板片流体影响并发生地壳 AFC (同化混染与分离结晶同时出现) 作用有关, 但它们亏损 Nb 等高场强元素的特征, 并不是地壳物质影响所致, 而反映了地幔岩浆源区的特点, 表明岩浆形成于与俯冲有关的环境。这一研究进一步证明, 在大别山北麓的北淮阳地区, 曾经发育了奥陶纪岩浆弧, 向西与北秦岭岩浆弧相接。从大别山北麓的马吸杂岩体到昆仑山的布青山英云闪长岩体, 中央造山带内与俯冲有关的侵入岩侵位年龄有向西变新的趋势, 可能意味着原特提斯秦岭洋在向华北地块南缘活动大陆边缘俯冲过程中, 是从东向西逐渐关闭的。

关键词 锆石 U-Pb 年龄; 闪长岩; 古生代; 岩浆弧; 大别造山带

中图分类号 P597.3; P588.122; P534.42

* 本研究得到国家自然科学基金(49972022, 40334037)和高等学校博士点基金(20010491018)的资助

第一作者简介: 马昌前, 男, 1958 年生, 博士, 教授(博士生导师), 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: cqma@cug.edu.cn

引言

近 10 年来,由于超高压变质岩的确定和深入研究,大别山三叠纪碰撞造山作用以及随后的岩浆活动已经受到了广泛关注(周泰禧等 1995; Ma *et al.*, 1998; 金成伟和郑祥身, 1998; Jahn *et al.*, 1999; 李曙光等, 1999; 魏春景和张立飞, 2000; 王强等, 2001; Zhang *et al.*, 2002; Chen *et al.*, 2002; 邱检生等, 2002),但迄今对大别造山带中生代深俯冲之前构造历史的研究还非常薄弱。近年来,在大别造山带尤其是其西端和北淮阳地区已经获得了一系列古生代构造-热事件和高压变质作用的年代学记录(Kröner *et al.*, 1993; 牛宝贵等, 1994; Zhai *et al.*, 1998; 简平等, 2000),但对其地质意义仍众说纷纭。Lerch *et al.* (1995a, 1995b), Li *et al.* (1995) 和 Xue *et al.* (1996a, 1996b) 根据陕西省周至地区钙碱性侵入岩的研究,提出在北秦岭存在中志留世-早泥盆世的岩浆弧记录,并分析了古生代以来北秦岭地区的构造演化历史; Li *et al.* (2001) 根据北淮阳地区定远组变基性火山岩的地球化学分析和全岩 Sm-Nd 和 Rb-Sr 等时线年龄测定结果,认为该区存在 450Ma 左右的岛弧玄武岩,并可北秦岭丹凤群的岛弧型变质火山岩对比,但对于北秦岭岩浆弧中的侵入岩带向东能否延伸到北淮阳地区的北淮阳地区,目前还缺少系统的年代学和地球化学资料^[28]加以证明。本文根据北淮阳构造带内马畷闪长质杂岩体的研究,从侵入岩角度提出了大别山北麓存在加里东期岩浆弧的年代学和岩石地球化学新证据,并讨论了与该岩浆弧有关的壳幔相互作用机理。

2 地质背景

该岩体所在的马畷地区属于北淮阳构造带的一部分(杨坤光等, 1998, 2000)。马畷地区自南向北出露了 4 套岩石地层组合(图 1): (1) 中上泥盆统(原信阳群和苏家河群的一部分), 分布于周党-商城断裂(简称周商断裂)以南, 为一套变质砂岩-片岩组合和花岗岩片麻岩; (2) 震旦系-寒武系, 分布于周商断裂和龟山-梅山断裂(简称龟梅断裂)之间, 为一套变质碎屑岩, 出露云母石英片岩, 斜长角闪岩和大理岩透镜体; (3) 下古生界, 分布于龟梅断裂以北, 是马畷闪长质杂岩体的主要围岩, 主要岩性为角闪斜长片麻岩, 有镁铁质-超镁铁质岩块出露, 被认为是蛇绿混杂岩的组成部分, 其上部夹大理岩透镜体, 岩石糜棱岩化较强, 由北而南低角度的逆冲剪切明显(刘志刚等, 1994); 在变质杂岩中获得过 401.5 ± 3.8 Ma 的角闪石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄, 认为代表了洋盆闭合和碰撞造山作用的时代(牛宝贵等, 1994); (4) 晚古生代及更年轻的地层, 分布于龟梅断裂以北, 其中, 石炭纪陆源碎屑岩为一套含煤岩系, 它作为大别山北麓的残留海盆地沉积以角度不整合盖在下古生界之上, 未遭受强烈的区域变质(王瑜, 1994; 李宝芳等, 2000)。在该区北部, 还有晚侏罗世陆相红

盆沉积和早白垩世喷发的玄武岩。

马畷闪长质杂岩体由一系列小岩体构成, 总体呈 NW290° 展布, 出露面积约 52 km²。岩体面理普遍比较发育, 其产状与围岩中区域性面理基本一致(图 1)。构造分析表明, 岩体侵位后, 至少有两次明显的构造变形(杨坤光等, 1998, 2000), 因而, 该岩体是一个构造前侵入体。

该杂岩体主要包含了花岗闪长岩、石英闪长岩、正长闪长岩和闪长岩等岩石。岩体中存在两类不同的岩石, 一类暗色矿物尤其是角闪石较多, 岩石更偏基性, 变形相对较强, 晚期被花岗细晶岩所切, 主要分布在杂岩体南部(以后称为单元 I), 围岩为下古生界。另一类主要为石英闪长岩或花岗闪长岩, 闪长质包体常见, 除在杂岩体南部边缘局部可见外, 主要分布于杂岩体北侧(称为单元 II), 后期被新生代盆地所切。杂岩体中岩石的主要矿物成分为普通角闪石, 中性斜长石/更长石和石英, 在花岗闪长岩中, 有少量微条纹长石, 而在基性和超镁铁质岩石包体中, 角闪石内部可见残余的单独辉石。

3 年代学和地球化学

3.1 锆石 U-Pb 年龄测定结果

采用单颗粒锆石同位素稀释法对两个石英闪长岩样品(Ho, H009)进行了年龄测定(图 1)。样品的粉碎、锆石的精选、化学处理和锆石 U-Pb 同位素分析均由天津地质矿产研究所同位素实验室完成。锆石的溶解及其 U、Pb 分离采用 Krogh(1973)的方法, $^{205}\text{Pb}-^{235}\text{U}$ 混合稀释剂, U-Pb 同位素组成在 VG-354 热电质谱计上测定, 测试方法、流程和精确度已由李惠民等(1997)作了报道。U-Pb 分析结果列于表 1 中, 数据处理采用 ISOPLOT 软件(Ludwig, 1997)。

Ho 样品, 采于杂岩体的北部单元 II 内。其中的锆石颗粒, 大部分为浅褐色透明洁净自形晶体断块, 部分为短柱状, 长宽比为 1.5/1。该样品测量的 5 个点中, 除 5 号点的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值偏低(为 241)外, 其余 4 点有高的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值(916 - 5883), 表明计算的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 放射性成因同位素比值及所得年龄不会因比值校正中普通 Pb 成分的选择而引起明显变化, 因而数据的可信度较高。除点 4 和 5 外, 其余 3 点都给出 $t_{206} > t_{207} > t_{207/206}$ 表面年龄。在谐和图(图 2)上, 所有样品均落在谐和线及其附近, 它们给出的 t_{206} 加权平均年龄为 (463.5 ± 3.4) Ma (MSWD = 0.49) (见图 2 中 Ho 的插图)。

H009 样品, 岩石学特征与 Ho 相近, 具有单元 II 特点, 是穿插于南部单元中的一个分支。其中的锆石颗粒, 为浅黄色透明晶体, 多数晶体呈自形的长柱状, 长宽比为 4:1 至 3:1, 少部分为短柱状, 具有岩浆锆石的基本特点。除 2 号点的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值偏低(为 277)外, 其余 4 点有较低的普通 Pb 含量 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 411 - 2338$)。所有样品都给出 $t_{206} > t_{207} > t_{207/206}$ 的表面年龄, 且在谐和图(图 2)上, 这些样品点均落在

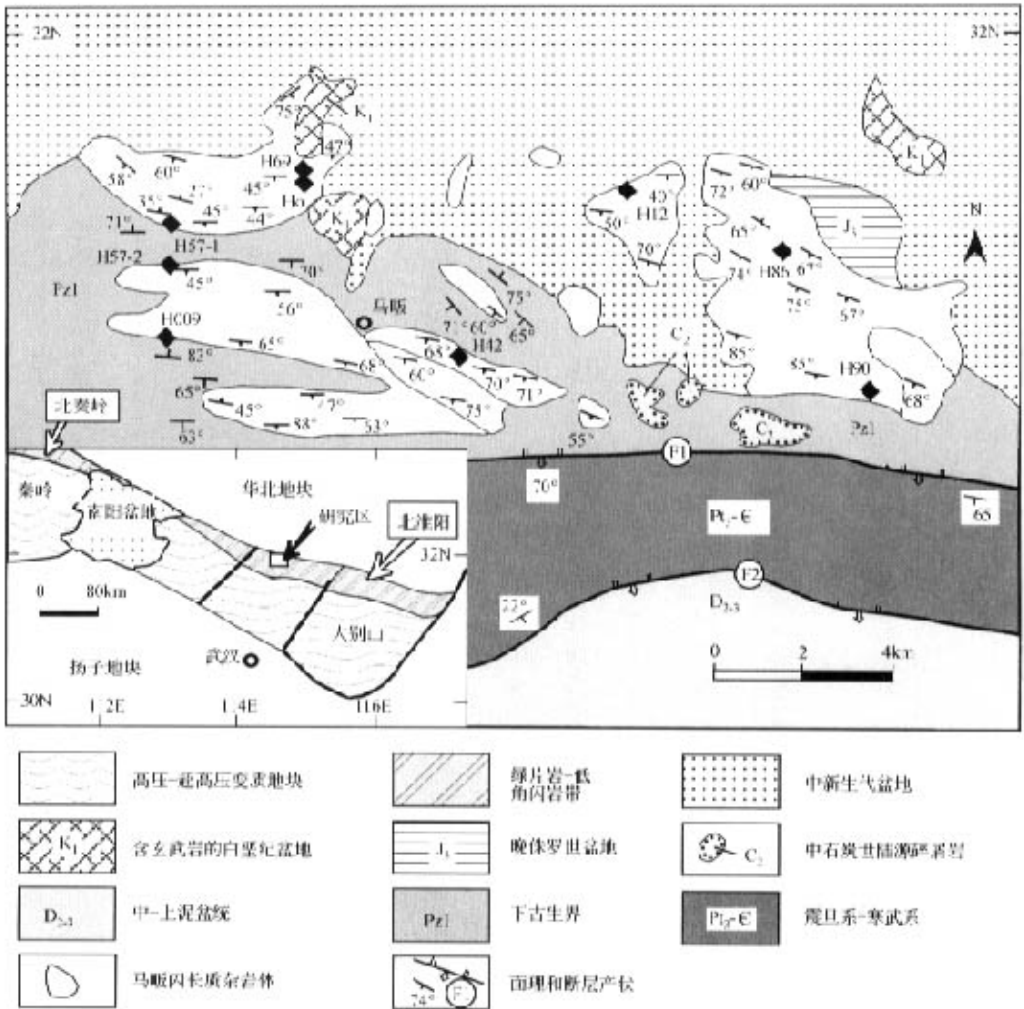


图1 马赋地区地质构造简图

断裂带:F1 龟梅断裂; F2 周商断裂。图中表示了本文讨论的马赋闪长质杂岩体的样品点分布(例如, H52 等)。内插图表示了研究区位置
 Fig.1 Geological-tectonic sketch map of Mafan region showing the major structural units and distribution of the samples studied in the paper (e. g. sample H52). Inset in the map shows the location of the study area.

谐和线及其附近,其中,2,3,4 和 5 号点落在谐和线 458 Ma 附近,而 1 号点由于有少量铅丢失,表面年龄偏新,在谐和图上落在 432Ma 附近。采用其余 4 点 t_{206} 加权平均年龄为 $(458.6 \pm 6.7) \text{Ma}$ (MSWD = 2.48) (见图 2 中 H009 的插图)。

3.2 角闪石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄测定结果

为了与锆石 U-Pb 年龄测定结果相对比,对选自石英闪长岩样品(Ho)中的角闪石在中国科学院地质研究所同位素

实验室进行了 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄测定。挑选的 0.2g 角闪石纯度达 98% 以上。样品在中国科学院原子能研究所 49-2 反应堆照射,照射时间为 55 小时 48 分钟,照射参数为 $J = 0.2667$ 。用于中子通量监测的样品是我国 K-Ar 法标准样 ZBH-25 黑云母,年龄为 132Ma。测试仪器为 RGA-10 气体源质谱计。角闪石的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ (快中子活化) 阶段加热分析数据列于表 2 中,坪年龄见图 3。可见,该角闪石样品中 96.24% 的 ^{39}Ar 释放部分确定的坪年龄为 $(462.7 \pm 1.4) \text{Ma}$, 在误差范围内与该样品锆石 U-Pb t_{206} 加权平均年龄一致。

表1 马阪石英闪长岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄测定结果

Table 1 Zircon U-Pb dating results of Mafan quartz diorites

锆石特征	重量 (μg)	浓度 ($\mu\text{g/g}$)		普通铅 含量 (ng)	同位素原子比率 $\pm 2\sigma^*$					表面年龄 (Ma)		
		U	Pb		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$
Ho												
1. 浅褐色透明短柱状晶体	10	145	14	0.007	937	0.3486	0.07364 ± 294	0.5650 ± 330	0.05564 ± 216	458.1	454.8	438.2
2. 浅褐色透明晶体断块	15	360	34	0.028	916	0.3562	0.07378 ± 148	0.5612 ± 148	0.05517 ± 95	458.9	452.3	419.0
3. 浅褐色透明晶体断块	15	559	51	0.007	5883	0.3473	0.07471 ± 87	0.5767 ± 95	0.05598 ± 59	464.5	462.3	451.7
4. 浅褐色透明晶体断块	15	400	39	0.029	981	0.3704	0.07479 ± 122	0.5793 ± 134	0.05618 ± 83	462.3	464.0	459.1
5. 浅褐色透明短柱状晶体	15	312	35	0.098	241	0.3741	0.07482 ± 145	0.5819 ± 179	0.05641 ± 123	464.0	465.7	468.6
H009												
1. 浅黄色透明短柱状自形晶体	15	543	40	0.015	2338	0.1579	0.06942 ± 92	0.5304 ± 100	0.05542 ± 69	432.7	432.1	429.1
2. 浅黄色透明短柱状自形晶体	10	440	41	0.077	277	0.0959	0.07292 ± 155	0.5610 ± 176	0.05571 ± 116	453.7	451.6	440.9
3. 浅黄色透明长柱状自形晶体	15	776	60	0.003	16459	0.1754	0.07318 ± 63	0.5645 ± 66	0.05595 ± 40	455.3	454.5	450.3
4. 浅黄色半透明长柱状自形晶体	15	818	66	0.040	1450	0.1521	0.07406 ± 101	0.5683 ± 110	0.05565 ± 68	460.6	456.9	438.5
5. 浅黄色透明长柱状自形晶体	15	454	41	0.081	411	0.1678	0.07471 ± 103	0.5737 ± 119	0.05569 ± 77	464.5	460.4	440.1

* $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 已对实验空白 ($\text{Pb}=0.050\text{ng}$, $\text{U}=0.002\text{ng}$) 及稀释剂作了校正。其它比率中的铅同位素为放射成因铅同位素。 2σ 为绝对误差。

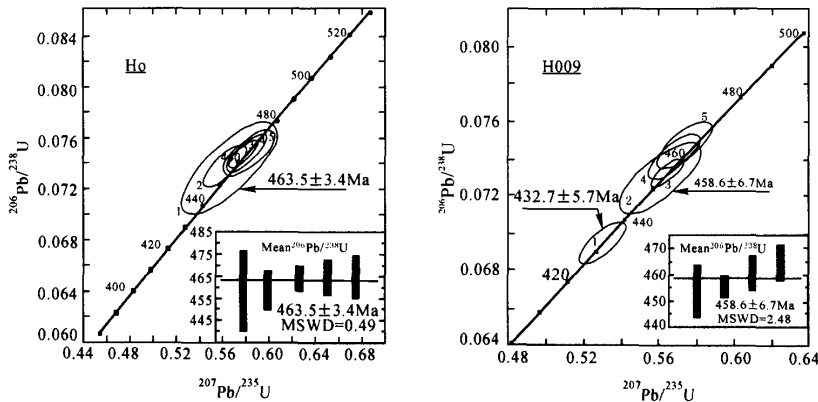


图2 马贩石英闪长岩(Ho, H009)的U-Pb年龄曲线谱和图内插图表示了²⁰⁶Pb/²³⁸U表面年龄统计权重平均值分布

Fig.2 The U-Pb age concordia curve of Mafan quartz-diorite (samples Ho and H009)

表2 马贩石英闪长岩(样品Ho)普通角闪石⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄资料

Table 2 Hornblende ⁴⁰Ar-³⁹Ar age data of Mafan quartz-diorite (sample Ho)

温度 (°C)	(⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁶ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁷ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁸ Ar/ ³⁹ Ar) _m	³⁹ Ar _K mole × 10 ⁻¹²	(⁴⁰ Ar* / ³⁹ Ar _K) ±σ	³⁹ Ar _K (占总量%)	表观年龄 ±σ(Ma)
普通角闪石; J=0.2667; 样品重=0.20g								
520	36.111	7.407	0.917	0.389	0.09	14.40 ± 1.14	0.21	586.3 ± 40.0
650	47.586	0.103	1.319	0.276	0.05	17.27 ± 0.76	0.12	683.6 ± 25.0
780	23.889	0.0309	0.931	0.136	0.27	14.89 ± 0.76	0.64	603.2 ± 26.5
900	13.857	0.0191	1.307	0.105	0.35	8.36 ± 0.44	0.83	363.0 ± 17.5
1,050	12.625	0.0104	3.308	0.335	0.80	9.81 ± 0.40	1.89	419.3 ± 15.7
1,200	11.225	0.00148	2.560	0.383	32.73	11.00 ± 0.35	77.27	464.1 ± 13.8
1,350	11.429	0.00251	2.825	0.421	6.66	10.93 ± 0.36	15.73	461.3 ± 14.1
1,500	14.048	0.0083	3.107	0.441	1.40	11.86 ± 0.44	3.31	495.7 ± 16.8
坪年龄(1200°C ~ 1,350°C)								462.7 ± 1.4

$\lambda = 5.543 \times 10^{-10} / \text{年}$

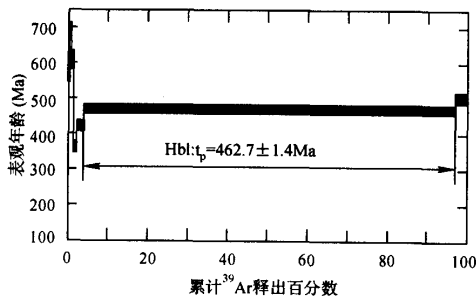


图3 马贩石英闪长岩(Ho)普通角闪石⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄谱

Fig.3 Hornblende ⁴⁰Ar-³⁹Ar age spectrum of Mafan quartz-diorite (Ho)

3.3 地球化学特征

主要元素分析在湖北省地质实验研究所完成,除H₂O采用重量法、CO₂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H₂O外为1%。微量元素和Sm-Nd同位素分析在中国地质大学及国土资源部“壳幔体系组成、物质交换及动力学开放研究实验室”完成。微量元素用ICP-MS法测定,经国际标准(AGV-安山岩标样和G-2花岗岩标样)和国家标准(GSR-1花岗岩, GSR-3玄武岩)监控,误差小于5%~10%。Nd同位素分析全程本底Sm和Nd分别为约35pg和100pg, La Jolla标准 w(¹⁴³Nd)/w(¹⁴⁴Nd)测定值为 0.511850 ± 0.000005, BCR-2 标准分析结果为 w(¹⁴³Nd)/w(¹⁴⁴Nd) = 0.512637 ±

0.000005, $w(\text{Nd}) = 29.51 \times 10^{-6}$, $w(\text{Sm}) = 6.644 \times 10^{-6}$, $w(^{143}\text{Sm})/w(^{144}\text{Nd}) = 0.1361$. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 的计算参数采用 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512638$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.1967$, 亏损地幔 Nd 同位素模式年龄 T_{DM} 的计算采用 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.51315$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.2137$. 有关的地球化学资料列于表 3 中。其中, 富铁镁质成分的样品, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} > 0.12$ (地壳平均值), 具有相似于地幔的地球化学特征, 故没有计算模式年龄。

地球化学资料表明, 马暇闪长质杂岩体两单元的岩石有明显区别。单元 I 属于亚碱性岩石 (图 4a), 在 SiO_2 对 K_2O 图解中 (图 4b) 则具钙碱性岩石特点。而从单元 I 到单元 II, 岩石的全碱含量增高, K_2O 含量也有增大的趋势, 单元 II 和包体在图 4 中分别表现出了从亚碱性-碱性系列岩石的过渡特点, 以及从钙碱性向高钾钙碱性的变化。最值得注意的是, 两类岩石的 REE 型式不同 (图 5): 它们有相似而没有强烈亏损的 HREE 含量, 但二者的 LREE 含量不同, $(\text{La}/\text{Yb})_n$ 的值有明显差别: 单元 I 轻、重稀土分异不明显, $(\text{La}/\text{Yb})_n$ 约为 2-5, 具有弱/中等的正 Eu 异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1.06-1.40$); 而单元 II 明显富 LREE, 稀土分异显著, $(\text{La}/\text{Yb})_n$ 大于 20, 为弱的负 Eu 异常和无 Eu 异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.87-1.01$)。所有岩石的 Eu/Eu^* 值与 SiO_2 含量呈负相关关系 (表 3)。采自花岗闪长岩中的包体 (H12-b, 采样位置同 H12) 具有比主岩体两单元岩石更低的 SiO_2 和更高的 MgO 及 FeO 含量, 但它的稀土元素分配型式却与单元 I 相似 (图 5), 反映了它们之间的联系, 在先后关系上, 单元 II 应晚于单元 I。两单元岩石在 REE 型式的差别, 可能与角闪石和/或辉石的分异有关。

岩石的微量元素丰度与 SiO_2 含量也有一定的正相关关系, 且在球粒陨石标准化图中, 所有岩石都显示了明显的负 Nb 异常, 部分岩石弱亏损 Zr 或 Ti (图 5)。马暇闪长质杂岩体的 $\epsilon_{\text{Nd}}(460 \text{ Ma})$ 在 4.3 ~ -1.8 之间。岩石的 $\epsilon_{\text{Nd}}(460 \text{ Ma})$ 值与 MgO 和 CaO 含量呈正相关关系, 而与 SiO_2 、Nb 含量和球粒陨石标准化的 La/Yb 比值呈负相关关系。单元 I 和铁镁质包体的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值最高, 而单元 II 的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 的较低。对 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值接近地壳岩石平均值 (< 0.12) 的样品, 其单阶段的 Nd 同位素模式年龄 (T_{DM}) 接近 1.1Ga (表 3)。

4 讨论和结论

高场强元素 (Nb, Zr, Ti) 的亏损是与俯冲有关的火成岩的共同特征 (Briqueu *et al.*, 1984; Brouxel *et al.*, 1987; Tarney and Jones, 1994), 但也可以因地壳混染所致 (Ma *et al.*, 1998), 而地壳的混染会有低的 ϵ_{Nd} 值。为了确定 Nb 的亏损是否为地壳物质影响所致, 用 $\text{Nb}/\text{Nb}^* [= 2\text{Nb}_n / (\text{K}_n + \text{Sr}_n)]$, n 代表球粒陨石标准化) 代表岩石 Nb 异常的大

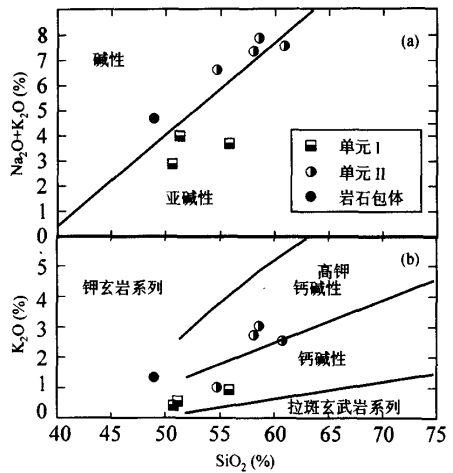


图 4 马暇闪长质杂岩体 (a) SiO_2 对 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (据 MacDonal, 1968) 和 (b) SiO_2 对 K_2O (Peccerillo and Taylor, 1976) 图解

Fig. 4 (a) SiO_2 vs. $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ and (b) SiO_2 vs. K_2O plots for Mafan dioritic complex

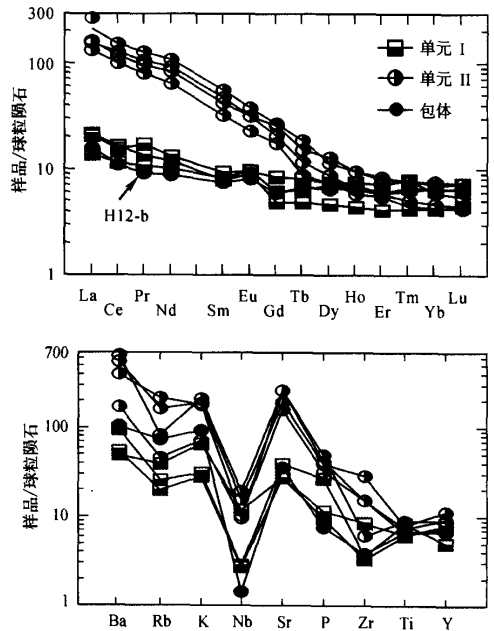


图 5 球粒陨石标准化的稀土和微量元素图解
稀土和微量元素标准化值分别据 Taylor and McLennan (1985) 和 Thompson (1982)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE and trace element patterns for Mafan dioritic complex.

表3 马畷闪长质杂岩体代表性岩石成分(主要氧化物用%, 微量元素用 10^{-6})

Table 3 Selected whole-rock analyses of major, trace and rare-earth elements (oxides are given in %, and elements in 10^{-6})

单元 样品号	I			II				包体
	H42	H57-1	H57-2	H009	H86	H69	H12	H12-b
SiO ₂	55.83	51.03	50.72	54.71	60.87	58.69	58.11	48.85
TiO ₂	0.63	0.85	0.62	0.90	0.67	0.75	0.81	0.68
Al ₂ O ₃	16.00	18.84	16.61	17.57	16.53	17.36	16.09	15.69
Fe ₂ O ₃	2.87	4.37	2.88	6.10	3.31	4.73	3.30	4.80
FeO	4.21	5.75	6.72	1.72	1.72	1.23	2.75	5.37
MnO	0.14	0.14	0.20	0.12	0.09	0.10	0.11	0.18
MgO	5.10	3.27	6.69	2.70	2.73	1.79	3.28	8.13
CaO	8.92	9.12	10.66	7.37	5.13	5.59	6.65	9.78
Na ₂ O	2.76	3.69	2.53	5.60	5.01	4.88	4.61	3.31
K ₂ O	0.94	0.45	0.41	1.04	2.56	3.03	2.74	1.33
P ₂ O ₅	0.12	0.28	0.10	0.52	0.34	0.44	0.41	0.08
H ₂ O ⁺	1.76	1.39	1.67	1.13	0.57	0.95	0.52	1.54
CO ₂	0.05	0.46	0.02	0.07	0.04	0.13	0.09	0.04
总和	99.33	99.64	99.83	99.55	99.57	99.67	99.47	99.78
Mg [#]	57.2	37.6	56.1	40.0	50.9	36.8	50.5	59.9
Rb	13.7	8.98	6.93	16.2	75.2	28.6	57.0	25.5
Sr	320	462	325	3088	1864	3060	2282	419
Ba	172	332	191	593	1406	2302	1947	369
Ta	1.33	nd.	nd.	nd.	0.06	1.58	0.088	nd
Nb	4.1	0.98	0.95	3.32	3.60	6.8	5.53	0.50
Hf	2.48	0.59	0.77	1.21	2.77	4.43	4.63	0.88
Zr	58.1	25.2	22.6	42.3	105.0	104.1	199	26.3
Y	15.53	10.0	15.8	18.0	13.4	18.01	22.5	14.2
Th	7.4	0.97	0.68	1.47	4.69	8.8	3.79	0.38
U	1.37	0.35	0.18	0.22	0.43	0.31	1.02	0.08
Cr	174.2	40.5	135	80.8	71.1	55.0	71.0	315
Ni	37.1	15.0	44.9	44.6	36.7	27.0	38.9	106
Sc	31.1	22.0	42.7	15.6	9.87	11.2	12.7	37.2
Nb/Nb [*]	0.254	0.080	0.097	0.057	0.061	0.083	0.082	0.022
La	7.50	7.91	4.99	60.6	49.9	79.19	58.2	5.77
Ce	14.94	15.7	10.9	114	96.7	150.20	123	10.5
Pr	2.34	1.85	1.47	13.4	11.0	17.65	14.9	1.26
Nd	9.32	8.39	7.17	60.0	46.1	78.54	66.5	6.27
Sm	2.17	1.82	1.90	9.76	7.47	12.96	11.0	1.70
Eu	0.82	0.77	0.84	2.74	1.99	3.29	2.77	0.70
Gd	2.59	1.47	1.86	6.25	5.40	8.16	7.87	1.82
Tb	0.47	0.28	0.37	0.67	0.51	1.07	0.88	0.39
Dy	2.85	1.77	2.65	3.31	2.85	4.37	4.96	2.45
Ho	0.63	0.37	0.59	0.55	0.49	0.80	0.81	0.57
Er	1.79	1.02	1.48	1.44	1.36	1.97	2.10	1.48
Tm	0.28	0.15	0.24	0.18	0.16	0.28	0.27	0.22
Yb	1.74	1.04	1.58	1.15	1.06	1.47	1.87	1.62
Lu	0.28	0.17	0.25	0.17	0.16	0.21	0.28	0.24
∑REE	47.72	42.71	36.29	274.22	225.15	360.16	295.14	34.99
(La/Yb) _n	2.91	5.13	2.13	35.53	31.74	36.32	20.98	2.40
Eu/Eu [*]	1.06	1.40	1.35	1.01	0.92	0.91	0.87	1.21
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd		0.1337	0.1586	0.0996	0.0953	0.0982	0.1032	0.1707
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd ± 2σ		0.512558 ± 8	0.512745 ± 7	0.512304 ± 5	0.512406 ± 7	0.512249 ± 5	0.512333 ± 5	0.512655 ± 8
ε _{Nd} (460 Ma)		2.1	4.3	-0.8	1.4	-1.8	-0.5	1.9
T _{DM} (Ga)				1.1	1.0	1.2	1.1	

Mg[#] = 100Mg/(Mg + Fe), Nb/Nb^{*} [= 2Nb_n/(K_n + Sr_n)], Eu/Eu^{*} = 2Eu_n/(Sm_n + Gd_n), 其中, 下标 n 表示球粒隕石标准化. 标准化值据 Taylor and McLennan(1985) 和 Thompson(1982). nd, 未测定.

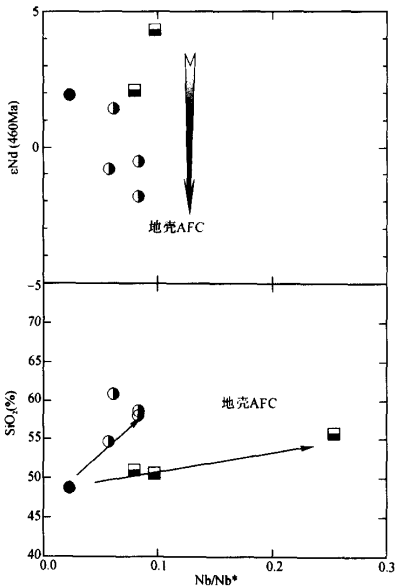


图6 Nb/Nb* 对 $\epsilon_{Nd}(460Ma)$ 和 SiO_2 图解
 标准化值据 Taylor and McLennan(1985), 图例同图4
 Fig. 6 Plots of Nb/Nb^* vs. $\epsilon_{Nd}(460Ma)$ and $SiO_2(\%)$

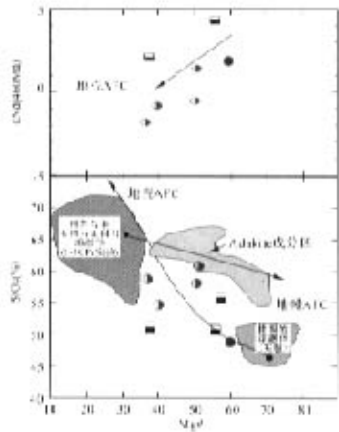


图7 Mg^* 对 $\epsilon_{Nd}(460Ma)$ 和 SiO_2
 (Stern and Kilian, 1996) 图解
 标准化值据 Taylor and McLennan(1985), 图例同图4
 Fig. 7 Diagrams Mg^* vs. $\epsilon_{Nd}(460Ma)$ and SiO_2

小(表3), 并作图表示 Nb 的亏损程度与 ϵ_{Nd} 和 $SiO_2(\%)$ 间的
 变异关系。从图6可见, 岩石的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值与 Nb/Nb^* 值之间
 并无明显的相关关系, 而 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 1.9 的铁镁质包体
 ($SiO_2 = 49\%$), 具有最小的 Nb/Nb^* 值(0.02)。一般说来,
 地壳 AFC(同化混染与分离结晶同时出现)会引起岩石 SiO_2

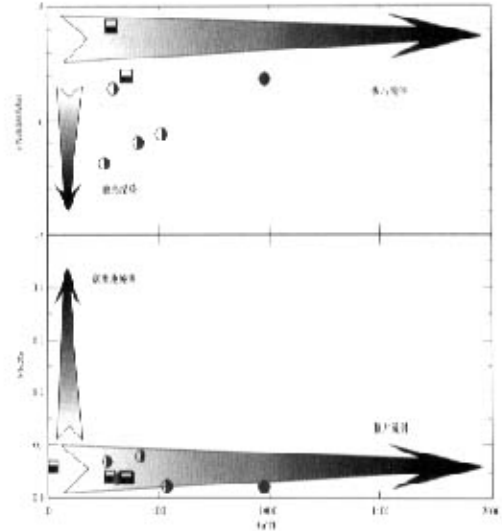


图8 Ba/Th 对 $\epsilon_{Nd}(460Ma)$ 和 Ba/Th 对 Nb/Zr 图解
 (Abratis, 1998). 图例同图4
 Fig. 8 Plots of Ba/Th vs. $\epsilon_{Nd}(460Ma)$ and Ba/Th vs. Nb/Zr

含量升高。然而, 当岩石的 SiO_2 增大时, Nb/Nb^* 不是降低而
 是增大(图6), 意味着负 Nb 异常并不是地壳混染的结果。
 为了限定马暇闪长质杂岩体的岩石成因, 在 Mg^* 对 SiO_2 图
 中分别列出了地幔橄榄岩、地壳基性岩和俯冲板片不同源岩
 实验产生的熔体成分区以及地壳和地幔 AFC 的演化趋势。可
 见, 在该图中铁镁质包体 H12-b 的成分与实验确定的由橄
 榄岩产生的部分熔体成分相近(图7), 较大的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值也
 说明地壳混染的影响较小。因此, 该铁镁质包体应接近于
 幔源原生岩浆成分, 但与单元 I 相比, 该包体的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值
 较低, 可能与后面讨论的板片流体影响有关, 而具有最大
 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值的样品, 即单元 I 中的 H57-2, 负 Nb 异常也很明
 显($Nb/Nb^* = 0.097$)。尽管有多种过程可以导致 Nb 的亏
 损(McCulloch and Gamble, 1991), 但上面的分析表明, 马
 暇闪长质杂岩体中铁镁质岩石的负 Nb 异常, 是继承了地
 幔岩浆源区的特点, 反映了岩浆形成于与俯冲有关的环境。

在 Mg^* 对 SiO_2 图(Stern and Kilian, 1996) 中, 马暇杂
 岩体中的中酸性岩石, 其成分点与实验确定的由基性岩熔
 融岩浆产物有明显差别, 大多数样品也偏离了由板片熔
 融产生的埃达克岩(adakite)成分区, 与 HREE 没有显著
 亏损的特点一同说明它们不是典型的埃达克岩, 但却与
 铁镁质包体一道, 分布于幔源岩浆在上升分异过程中受
 到地壳物质混染(AFC)作用影响的成分线附近(图7)。因
 此, 这些中酸性岩石的成分特点, 意味着它们主要并不
 是下地壳基性岩或俯冲板片部分熔融产物, 而更可能为
 幔源基性岩浆在地壳内发生 AFC 作用的结果。这些岩石
 的 Mg^* 值与 $\epsilon_{Nd}(t)$ 之间具有明显的相关关系(图7), 正
 是岩浆发生 AFC 的证据。它们较低的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值以及老于
 新元古代的亏损地幔模式年龄(表3), 表

明混染的地壳物质是新元古代以前的。众所周知, Ba 在流体中的活动性远高于 Th, 因此, 可以用 Ba/Th 的比值来度量与俯冲有关的流体对岩浆源区的贡献。俯冲沉积物平均的 Ba/Th 比值较低 (<100), 而高的 Ba/Th 比值就可能与来自俯冲板片的流体有关 (Abratis, 1998)。具不同离子半径的不活动元素的比值可以度量地幔源区的成分。例如, 低的 Nb/Zr 比值是地幔因先前的熔融作用而发生亏损的标志 (Pearce and Norry, 1979)。图 8 也表示了马鞍山杂岩体 Nb/Zr 比值与 Ba/Th 比值的变异关系, 可见, 有关的岩石显示了亏损地幔源区受到了板片流体影响的地球化学特点。总之, 图 6, 7, 8 综合表明, 可以用地幔熔体、板片流体和陆壳岩石等组分的混合或相互作用来初步解释该杂岩体的地球化学特征。

以上资料进一步证明, 在大别山北麓的北淮阳地区, 中奥陶世时期曾经发育了岩浆弧, 这一岩浆弧的基底包含了前寒武纪陆壳岩石, 因而是一大大陆岩浆弧或活动大陆边缘。这就意味着, 它代表了北秦岭古生代岩浆弧的东延部分。Meng and Zhang (2000) 指出, 在新元古代晚期-早古生代时期, 在北、南秦岭之间存在一原特提斯秦岭洋; 在奥陶纪时期, 这一洋盆向北俯冲, 北秦岭演化为华北地块的活动大陆边缘, 并在中古生代时期, 原特提斯秦岭洋关闭, 北-南秦岭沿商丹缝合带发生碰撞。随后在晚古生代时期, 古特提斯秦岭洋打开, 与华北地块和北秦岭拼合在一起的南秦岭从扬子地块中分出, 而古特提斯秦岭洋的关闭和华北-扬子地块的碰撞发生在晚三叠世。因此, 中奥陶世时期在北淮阳地区发生的弧岩浆作用, 是原特提斯秦岭洋消减作用的结果。Li *et al.* (2001) 在北淮阳构造带的定远组中, 鉴别出了奥陶纪时期的岛弧玄武岩, 给出的全岩 Sm-Nd 和 Rb-Sr 等时线年龄分别为 446 ± 23 和 445 ± 31 Ma, 对比本文的侵入岩定年结果, 二者在误差范围内基本一致。这表明, 马鞍山地区是这一岩浆弧的根带部分。

在北淮阳以西, 从北秦岭-昆仑山的中央造山带内, 已经报道了多个古生代侵入岩体具有岩浆弧成分特征。从东到西的典型例子包括: 产于河南省卢氏县境内的熊耳岭石英二长岩体, 全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 457 Ma (李先祥等, 1993); 在秦岭杂岩核部的灰池子花岗岩体, 单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 437 ± 58 Ma (李伍平等, 2000); 陕西省华县老牛山黑云母二长花岗岩体, 全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 428 Ma (李伍平等, 2000); 周至县黑河石英闪长岩杂岩体, 单颗粒锆石 U-Pb 年龄 406 ± 4 Ma (Lerch *et al.*, 1995a, 1995b; Li and Sun, 1995; Xue *et al.*, 1996, 2001); 侵入于早古生代阿尼玛卿蛇绿混杂岩带内的布青山英云闪长质杂岩体, 其锆石 U-Pb 年龄为 402 ± 24 Ma (边千韬等, 1999)。尽管这些年代学资料精度并不完全一致, 而且目前的资料还不能排除中央造山带西段存在与马鞍山杂岩体同时代的岩浆弧根带的岩体, 但北淮阳地区没有出露 400 Ma 左右的与俯冲有关的侵入岩, 因而从北淮阳的马鞍山杂岩体到昆仑山的布青山英云闪长岩体, 这些具有俯冲相关的侵入岩侵位年龄显示了向西变新的趋势。岩体时代的变化规律以及所蕴涵的原特提斯秦岭洋从东向西关闭的可能性, 值得开展深入研究。

致谢 第一作者曾受我校“211 工程”重点学科建设项目部分资助参加 Eurogranites 年度会议并交流初步成果。样品测试中得到了殷艳杰、桑海清以及“壳幔体系组成、物质交换及动力学开放研究实验室”凌文黎和胡圣虹等的帮助, 研究生续海金、刘强参加了野外考察。评审专家对稿件提出了建设性的修改意见, 对改进文章质量起了重要作用。

References

- Abratis M. 1998. Geochemical variations in magmatic rocks from southern Costa Rica as a consequence of Cocos Ridge subduction and uplift of the Cordillera de Talamanca. Universität zu Göttingen (Unpublished dissertation), 136
- Bian Qiantao, Luo Xiaoquan, Chen Haihong, Zhao Dasheng. 1999. Zircon U-Pb age of granodiorite - tonalite in the A'Nyemaqen ophiolitic belt and its tectonic significance. *Scientia Geologica Sinica*, 34(4): 420-426 (in Chinese with English abstract)
- Briqueu L, bougault H, Joron J L. 1984. Quantification of Nb, Ta, Ti and V anomalies in magmas associated with subduction zones; petrogenetic implications. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 68: 297-308
- Brouxel M, Lapierre H, Michard A *et al.* 1987. The deep layers of a Paleozoic arc: geochemistry of the Copley-Balaklala Series, northern California. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 85: 386-400
- Chen B, Jahn B-M, Wei C. 2002. Petrogenesis of Mesozoic granitoids in the Dabie UHP complex, central China; trace element and Nd-Sr isotope evidence. *Lithos*, 60: 67-88.
- Jahn B-M, Wu F-Y, Lo Ch-H *et al.* 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. *Chem. Geol.*, 157(1-2): 119-146
- Jian Ping, Liu Dunyi, Yang Weiran *et al.* 2001. SHRIMP dating of zircons from the Caledonian Xiongdiang eclogite, western Dabie Mountains, China. *Chinese Science Bulletin*, 40(1): 80-82
- Jin Chengwei, Zheng Xiangshen. 1998. Petrography and genesis of granitoid in Yuexi region, Dabie Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 14(4): 493-502 (in Chinese with English abstract)
- Krogh T E. 1973. A low contamination method for hydrothermal decomposition of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determinations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37: 485-494
- Kröner A, Zhang G, Sun Y. 1993. Granulites in the Tongbai area, Qinling belt, China: Geochemistry, petrology, single zircon geochronology, and implications for the tectonic evolution of eastern Asia. *Tectonics*, 12: 245-255
- Lerch M F, Xue F, Kröner A, *et al.* 1995. A middle Silurian-Early Devonian magmatic arc in the Qinling Mountains of Central China. *J. Geol.*, 103: 437-449
- Lerch M F, Xue F, Kröner A, *et al.* 1995. A middle Silurian-Early Devonian magmatic arc in the Qinling Mountains of Central China: a reply. *J. Geol.*, 104: 504-505
- Li Baofang, Ma Wenpu, Zhang Huijiang *et al.* 2000. A study on sedimentology and tectonics of the Carboniferous basin in the northern foothills of the Dabie Mountains, China. *Earth Science Frontiers* (China University of Geosciences, Beijing), 7(3): 153-167 (in Chinese with English abstract)
- Li Huimin, Li Huaikun, Lu Songnian *et al.* 1997. Determination of age of gold mineralization of Dongping gold deposits by U-Pb dating hydrothermal zircon from ore veins. *Acta Geoscientia Sinica - Bulletin of the Chinese Academy of Geological Geosciences*, 18 (sup.): 176-178 (in Chinese with English abstract)
- Li S-C, Huang F, Nie Y-H, *et al.* 2001. Geochemical and geochronological constraints on the suture location between the North and South China blocks in the Dabie orogen, central China. *Phys. Chem. Earth (A)*, 26: 655-672
- Li Shuguang, Hong Ji'an, Li Huimin, Jiang Laili. 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 with English abstract)
- Li Shuguang, Sun Weidong. 1995. A middle Silurian-Early Devonian magmatic arc in the Qinling Mountains of central China: a discussion. *J. Geol.*, 104: 501-503
- Li Wuping, Wang Tao, Wang Xiaoxia *et al.* 2000. Single zircon dating of Huichizi composite pluton in northern Qinling Mountains. *Regional Geology of China*, 19 (2): 172-174 (in Chinese with English abstract)
- Li Xianzi, Yan Zhen, Lu Xinxiang. 1993. Granite in Qinling-Dabie Mountains. Beijing: The Geological Publishing House. 1-44 (in Chinese with English abstract)
- Liu Zhigang, Niu Baogui, Fu Yunlian *et al.* 1994. The tectonostratigraphic units at the northern foot of the Dabie Mountains. *Regional Geology of China*, (3): 246-253 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig R K. 1997. ISOPLOT: A plotting and regression program for radiogenic-isotope data. USGS Open-file report, Version 2.92. 91-445
- Ma C. Q., Li Z. C., Ehlers, C. *et al.* 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: 431-456
- MacDonald, G A. 1968. Composition and origin of Hawaiian lavas. In: Coats R R, Hay R L, Anderson C A (eds.), *Studies in Volcanology*: Geological Society of America, Memoir, 116: 477-522
- McCulloch M T, Gamble J A. 1991. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 102: 358-374
- Meng Q-R, Zhang G-W. 2000. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, central China. *Tectonophysics*, 323: 183-196
- Niu Baogui, Fu Yunlian, Liu Zhigang *et al.* 1994. Main tectonothermal events and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Tongbai-Dabie Mountains. *Acta Geoscientia Sinica* — Bulletin of the Chinese Academy of Geological Geosciences, 1-2: 20-34 (in Chinese with English abstract)
- Pearce J A, Norry M J. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 69: 33-47
- Pecceirillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58: 63-81
- Qiu Jiansheng, Wang Dezi, Liu Hong *et al.* 2002. Post-collisional potash-rich volcanic rocks in the north margin of Dabie orogenic belt: geochemistry and petrogenesis. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 319-330 (in Chinese with English abstract)
- Stern C R, Kilian R. 1996. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral volcanic zone. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 123: 313-345
- Tarney J, Jones C E. 1994. Trace element geochemistry of orogenic igneous rocks and crustal growth models. *J. Geol. Soc.*, London, 151: 855-868
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. The continental crust: its composition and evolution. Blackwell, 312
- Thompson R N. 1982. Magmatism of the British Tertiary volcanic province. *Scottish Journal of Geology*, 18: 49-107
- Wang Qiang, Xu Jifeng, Zhao Zhenhua *et al.* 2001. The petrogenesis and dynamic significance of HREE depleted granitoids during Yanshan period in the Dabie Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 551-564 (in Chinese with English abstract)
- Wang Yu. 1994. The tectonic framework in the northern piedmont area of the Dabie Mountains. *Regional Geology of China*, (2): 141-147 (in Chinese with English abstract)
- Wei Chunjing, Zhang Lifei, Wang Shiguang. 2001. Mesozoic high-K granitic rocks from the eastern Dabie Mountains, Central China and their geological implications. *Science in China (Series D)*, 44(6): 525-534
- Xue F, Kröner A, Reischmann T, *et al.* 1996. Paleozoic pre- and post-collisional calc-alkaline magmatism in the Qinling orogenic belt, central China, as documented by zircon ages on granitoid rocks. *J. Geol. Soc.*, London, 153: 409-417
- Xue F, Lerch M F, Kröner A, *et al.* 1996. Tectonic evolution of the East Qinling Mountains, China, in the Palaeozoic: a review and new tectonic model. *Tectonophysics*, 253: 271-284
- Yang Kunguang, Ma Changqian, Yang Weiran. 1998. Significance of study of Mafan Caledonian intrusion in Beihuaiyang Depression. *Earth Science - Journal of China University of Geosciences*, 23(3): 236-241 (in Chinese with English abstract)
- Yang Kunguang, Ma Changqian, Yang Weiran *et al.* 2001. Two episodes of subduction and collision events at the northern foot of Dabie Mountains: Evidence from petrology and structural geology of granitoid rocks. *Science in China (Series D)*, 44(3): 201-212
- Zhai X, Day H W, Hacker B R, *et al.* 1998. Paleozoic metamorphism in the Qinling orogen, Tongbai Mountains, central China. *Geology*, 26: 371-374
- Zhang Hongfei, Gao Shan, Zhong Zengqiu *et al.* 2002. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of Cretaceous granitoids: constraints on tectonic framework and crustal structure of the Dabieshan ultrahigh-pressure metamorphic belt, China. *Chem. Geol.*, 2, 186 (3-4): 281-299
- Zhou Taixi, Chen Jiangfeng, Zhang Xun *et al.* 1995. Geochemical characteristics and geotectonic implications of granite-syenite in north Huaiyang. *Geological Review*, 41(2): 144-151 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 边千韬, 罗小全, 陈海泓等. 1999. 阿尼玛卿蛇绿岩带花岗岩-英云闪长岩锆石 U-Pb 同位素定年及大地构造意义. *地质科学*, 34(4): 420-426
- 简平, 刘敦一, 杨巍然等. 2000. 大别山西部熊店加里东期榴辉岩锆石离子探针测年. *科学通报*, 45(19): 2090-2093
- 金成伟, 郑祥身. 1998. 大别岳西地区花岗岩类岩石学及其成因. *岩石学报*, (4): 493-502
- 李宝芳, 马文璞, 张惠良等. 2000. 大别山北麓石炭纪盆地沉积和构造研究. *地学前缘*, 7(3): 153-167
- 李惠民, 李怀坤, 陆松年, 等. 1997. 用矿脉中热液锆石的 U-Pb 定年确定东坪金矿的成矿时代. *地球学报*, 18(增刊): 176-178
- 李曙光, 洪吉安, 李惠民等. 1999. 大别山辉石岩-辉长岩的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *高校地质学报*, 5(3): 351-355
- 李伍平, 王涛, 王晓霞等. 2000. 北秦岭灰池子复式岩体单颗粒锆石年龄. *中国区域地质*, 19(2): 172-174
- 李先梓, 严阵, 卢欣祥. 1993. 秦岭-大别山花岗岩. 北京: 地质出版社. 1-44
- 刘志刚, 牛宝贵, 富云莲等. 1994. 大别山北麓主要构造岩相带浅析-以信阳地区为例. *中国区域地质*, (3): 246-253
- 牛宝贵, 富云莲, 刘志刚等. 1994. 桐柏-大别山主要构造热事件及 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 地质定年研究. *地球学报*, 1-2: 20-34
- 邱检生, 王德滋, 刘洪等. 2002. 大别造山带北缘后碰撞富钾火山岩: 地球化学与岩石成因. *岩石学报*, 18(3): 319-330
- 王强, 许继峰, 赵振华等. 2001. 大别山燕山期亏损重稀土元素花岗岩类的成因及动力学意义. *岩石学报*, 17(4): 551-564
- 王瑜. 1994. 大别山北麓地区的构造格局. *中国区域地质*, (2): 141-147
- 魏春景, 张立飞, 王式洸. 2000. 安徽省大别山东段中生代高钾花岗岩质岩石及其地质意义. *中国科学(D辑)*, 30(4): 356-363
- 杨坤光, 马昌前, 简平等. 2000. 大别山北缘两次俯冲(碰撞)的岩石学和构造学证据. *中国科学(D辑)*, 30(4): 364-372
- 杨坤光, 马昌前, 杨巍然. 1998. 北淮阳马嘶加里东岩体的研究及其地质意义. *地球科学*, 23(3): 236-241
- 周泰禧, 陈江峰, 张巽等. 1995. 北淮阳花岗岩-正长岩地球化学特征及其大地构造意义. *地质评论*, 41(2): 144-151