

武当地区新元古代岩浆岩地球化学特征及其对南秦岭晋宁期区域构造性质的指示*

凌文黎 程建萍 王歆华 周汉文

LING WenLi, CHENG JianPing, WANG XingHua and ZHOU HanWen

中国地质大学地球科学学院, 武汉 730074

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

2001-04-11 收稿, 2001-06-22 改回.

Ling WL, Cheng JP, Wang XH and Zhou HW. 2002. Geochemical features of the Neoproterozoic igneous rocks from the Wudang region and their implications for the reconstruction of the Jinning tectonic evolution along the south Qinling orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 18(1):25–36

Abstract A comprehensive study of geochemistry was made on a series of the Jinning period (1.0~0.75Ga) igneous rocks from the Wudang region, South Qinling Orogenic belt (SQOB). It shows that the volcanics of Wudang Gp, aged ca. 1.0~0.95 Ga, have the affinities of arc magmas, and could be compared, in terms of geochemistry and ages, with those from the adjacent Xixiang Gp located at the northern margin of the Yangtze craton (NMYC) and Mogouxia volcanics from SQOB in Shanxi province. Yaolinghe volcanics and Wudang mafic dikes, which emplaced into both Wudang and Yaolinh Gps, share the magma characteristics of the continental rift, and are thought to be the equivalents of Tiechanshan alkaline volcanics and Wangjiangshan mafic swarms from the NMYC, which were radiometrically dated as ca. 0.82~0.78 Ga. The similar experience in tectonic evolution from subduction zone transforming to continental rifting in the two regions indicates that the NMYC and SQOB belong to a unique continental block, even though the later one is earmarked of strong deformation due to the Phanerozoic orogeny. T_{DM} model ages of ca. 1.2~0.9 Ga and high positive ϵ_{Nd} values for the Neoproterozoic igneous rocks of the Wudang region demonstrate that the Jinning events played extremely significant role in both crust growth and lithosphere evolution of the regiona.

Key words Wudang region, Jinning igneous rocks, South Qinling orogenic belt, Yangtze craton, unique continental block

摘要 对南秦岭武当地区武当群火山岩、基性侵入岩墙群和耀岭河群火山岩系统的元素和 Nd 同位素地球化学研究表明, 武当群火山岩为形成于约 1.0~0.9Ga 的新元古代陆缘岛弧火山岩, 而耀岭河群火山岩与武当地区基性侵入岩墙群为 0.82~0.78Ga 形成的大陆裂谷型同源岩浆岩; 它们分别可与扬子克拉通北缘西乡群和南秦岭陕西境内的镇安磨沟峡火山岩、扬子克拉通北缘的火地垭群铁船山组碱性火山岩和望江山基性侵入岩群相对比, 揭示出南秦岭与扬子克拉通北缘于晋宁期属统一的陆块。扬子克拉通北缘和南秦岭大量的新元古代岩浆岩所具有的 1.2~0.9Ga Nd 同位素模式年龄和较高的 ϵ_{Nd} 正值等特征表明, 晋宁期是扬子克拉通地壳增生和大陆岩石圈演化的重要时期之一。

关键词 武当地区; 晋宁期岩浆岩; 南秦岭; 扬子克拉通; 统一陆块

中图法分类号 P588.14; P597; P534.3

Nd 同位素地球化学填图或示踪研究表明, 元古宙晚期是我国主要大陆, 尤其是华南陆块(扬子克拉通与华夏古陆)一次重要的地壳生长期(Chen and Jahn, 1998; 李献华,

1996; 朱炳泉, 1998; 张理刚, 1995; 陆松年等, 1996; 张本仁等, 1996), 而区域系统的地质-地球化学研究也揭示出沿我国主要陆块的接合带及周边区域记录有大量的晋宁期构造

* 本文研究获国家自然科学基金项目(49873010, 49794043)、国土资源部科技项目(20001010203)和西北大学大陆动力学教育部重点实验室开放课题基金资助。

第一作者简介: 凌文黎, 1962年9月生, 博士, 副教授。主要研究领域: 前寒武纪、造山带地球化学和同位素年代学。

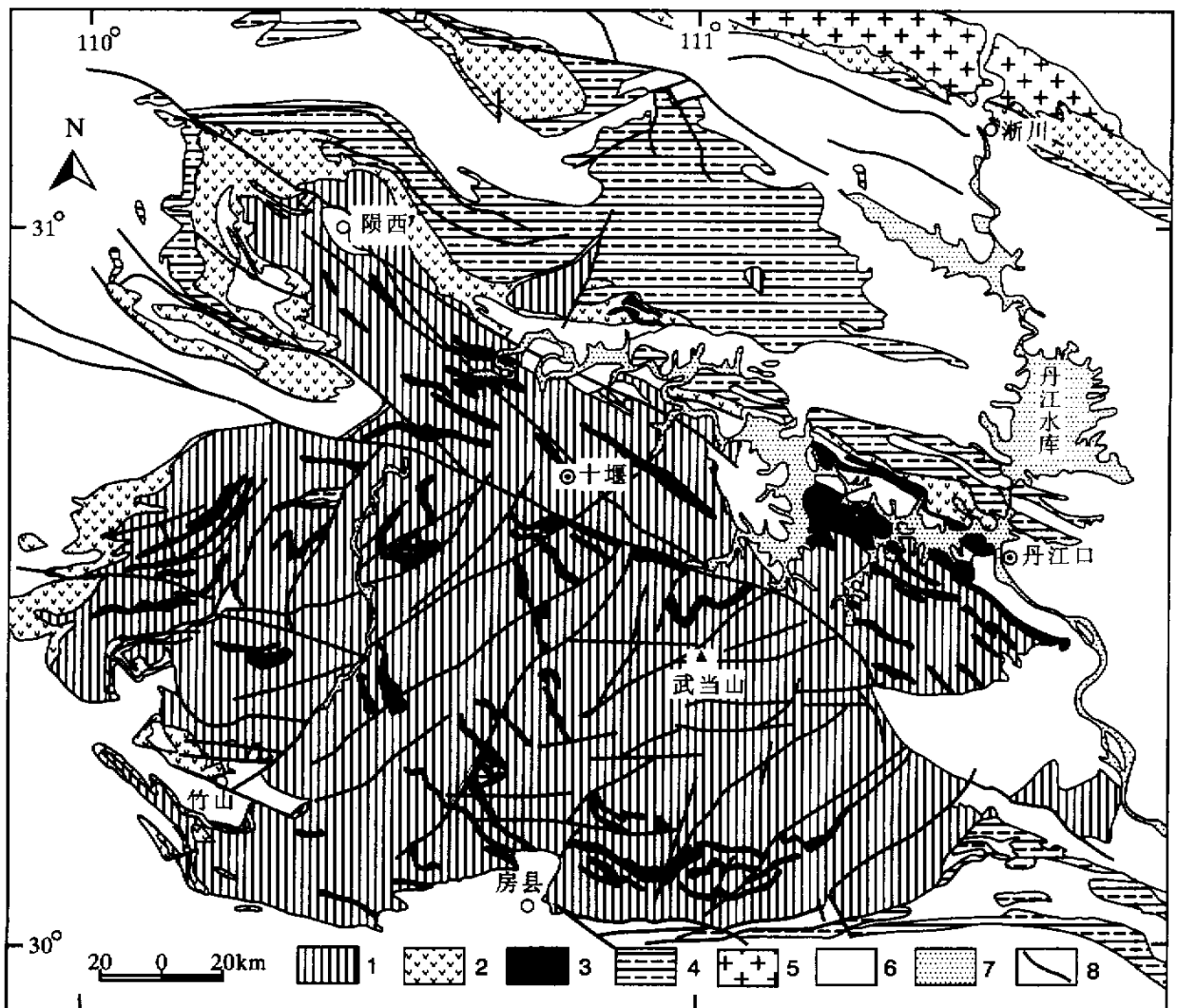


图1 南秦岭武当地区区域地质略图

1. 武当群; 2. 耀岭河群; 3. 基性岩墙; 4. 震旦系; 5. 中-酸性侵入岩; 6. 显生宙或震旦系与显生宙; 7. 水库; 8. 断裂

Fig. 1 Sketch geological map of the Wudang region, South Qinling Orogenic belt.

1. Wudang Gp.; 2. Yaolinghe Gp.; 3. mafic dikes; 4. Sinian; 5. mid-acid intrusions; 6. Phenozoic or Sinian plus Phenozoic; 7. reservoir; 8. fault

热事件,尤其是沿秦岭造山带及其两侧陆缘(如 Chen *et al.*, 1991; Gao *et al.*, 1996; Li, 1999; 张国伟等,1995; 李曙光等,1991; 周鼎武和张国伟,1991; 周新民和朱云鹤,1993; 邢风鸣等,1992)。显然,研究晋宁期构造运动及其所伴随的岩浆活动对探讨我国主要陆块于元古宙中晚期的构造性质与演化、相互关系和地壳增生均具有重要意义。

南秦岭作为连接扬子与华北克拉通的重要构造单元,主要由前震旦纪变质基底和震旦系及显生宙沉积层组成(张国伟等,1995; Zhang *et al.*, 1995; Meng and Zhang,

2000)。前震旦纪变质基底岩系中,具代表性的地质体(构造-岩石单元)有武当(岩)群、耀岭河群和侵入前两地质单元中的辉长-辉绿岩墙群等,它们均受到震旦系的不整合覆盖。现有的同位素定年值较集中于 1.1~0.75Ga,且部分研究者认为武当群中的火山岩与侵入其中的基性岩墙群属同期岩浆作用的产物;但也有研究者认为,以基性火山岩为主的耀岭河群具有陆内裂谷岩浆作用的性质(Gao *et al.*, 1996; 周鼎武等,1998),并与武当基性侵入岩墙群属同一岩浆过程的不同产出相(张成立等,1998,1999)。由于上述地质单元占据了

南秦岭中段所出露的前震旦系的绝大部分,因此要了解南秦岭元古宙中晚期区域构造格局及其与扬子克拉通或其它陆块的相互关系,查清各主要构成单元形成的构造背景和演化特征显得十分必要。本文以武当地区武当群、耀岭河群和辉长-辉绿岩墙群为研究对象,进行了系统的元素和 Nd 同位素地球化学研究,根据其地球化学性质所揭示的区域构造背景与演化特征,与扬子克拉通北缘和陕西境内南秦岭新元古代类似地质单元进行了对比,并就其相互关系进行了探讨。

1 研究区地质简况

研究区位于湖北西北部的陕西-十堰-丹江口-竹山-房县一带(简称武当地区,下同)的前寒武系隆起区(图 1),大地构造位置属秦岭造山带与大巴山东段交汇的构造复合部位,属南秦岭构造单元。区域内出露的最老岩系为武当群绿片岩相变火山-沉积岩系,主要分布于区内中部和南部,变沉积岩原岩岩性以长石石英质砂岩为主,夹少量粉砂质泥岩和泥质粉砂岩。变火山岩岩性以酸性为主、偏基性岩类次之。酸性岩原岩主要为英安-流纹质岩和酸性(晶屑、岩屑)凝灰岩,基性岩原岩主要为玄武-安山质熔岩或火山碎屑岩或凝灰岩。耀岭河群主要分布于武当隆起区周缘,并相对集中于区内偏北部和西部。耀岭河群与武当群之间呈(推覆型)韧性剪切带接触,具绿片岩相变质。耀岭河群岩性上以变玄武质火山岩(熔岩、火山碎屑岩或凝灰岩)为主,夹少量变酸性火山岩和变泥质岩。区域内与武当群和耀岭河群同时受到震旦系不整合覆盖的侵入岩岩浆岩为辉长-辉绿岩墙群,它们主要侵位于区域中部和南部的武当群中,少数侵入耀岭河群。岩墙群个体规模变化较大,出露宽度多为数百 m 至小于 1m 不等,由于后期强烈的变形作用,它们与寄主围岩间的接触界线多呈锯齿状或波浪状,并与围岩具相同的片理产状。岩墙群原岩为辉长辉绿岩或辉绿岩,具绿片岩相变质。震旦系盖层分布于区内周边地区,但以北部出露规模最大。虽受后期变形作用的明显影响,但震旦系盖层却无明显变质,与下伏武当群和耀岭河群形成明显区别。震旦系剖面地层组合可与三峡标准剖面对比,但下部缺失,仅发育中上部的陡山沱组和灯影组。值得指出,在区域东北部出露有同样受震旦系覆盖的中酸性-酸性侵入杂岩体,并侵入武当群和耀岭河群内。虽然目前其研究程度较弱,但有限的岩石学研究表明,至少部分岩体(白桑关金家庄小岩体)属碱性花岗岩(霓石含量约 3%^①)。

2 样品与分析

武当群样品采自房县-武当山-丹江口一线及陨县以北地区;耀岭河群样品采自区域北部陕西-丹江口一线,所有样品采样位置均受上覆震旦系和下伏武当群的空间约束;辉长-辉绿岩墙群样品采自陨县、十堰和丹江口周边地区。所有

被研样品均经镜下检查,绝大部分样品较为新鲜,但少数耀岭河群火山岩样品发育细小的以富集绿泥-绿帘石为主的蚀变微细脉,而部分辉长-辉绿岩样品受到了一定程度的风化。

对所采样品进行了系统的主量、微量元素(表 1)和 Nd 同位素分析(表 2)。武当群和基性侵入岩样品主量元素由湖北地质矿产局岩矿分析测试中心完成,而耀岭河群样品主量元素由西北大学地质系 X 荧光实验室经碱熔玻璃片制样方法测定,其中 FeO 采用湿法人工标定。经 BCR-2 或(和)GBW07105 标样监控,各项主量元素分析误差均小于 5%。微量元素分析和同位素分析均在设于中国地质大学的“岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室”完成,其中微量元素采用 POEMSIH 等离子体质谱测定,分析方法与 Qi *et al.* (2000)类似,并经 AGV-1、BCR-2、G2 和 RGM-1 标样监控,除个别 HREE 外,其余元素的分析相对误差均小于 5%~10%。Nd 同位素分析采用 MAT261 同位素比值质谱仪于静态多接收状态下测定,分析方法与流程同凌文黎等(1998)。分析过程中,La Jolla 的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 的测定值为 $0.511866 \pm 6(2\sigma_m, n=3)$,BCR-2 的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 、 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 及 Nd、Sm 含量($\mu\text{g/g}$)测定值分别为 $0.512641 \pm 5(2\sigma_m)$ 、0.1361、28.95 和 6.541。

3 地球化学特征

为保证研究样品的火山岩属性,对所选样品进行了镜下鉴定和地球化学判别,结果表明,除少数样品(WD14-1 和 WD14-2)外,其余样品的 ACNK 值($\text{Al}_2\text{O}_3/[\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}]$ 分子比)均为小于 1 的正变质岩浆岩。图 2 为样品主量元素 TAS(a, Cox *et al.*, 1979)和高场强元素(b, Winchester and Floyd, 1977)岩性判别图(武当群部分主量元素数据引自湖北省区域地质矿产调查所,1997,未刊),由图可见,耀岭河群火山岩具明显的双峰式火山岩特征,这一特征在其高场强元素($\text{Nb}/\text{Y} - \text{Zr}/\text{TiO}_2$)图解上尤为明显,且相当比例的样品属偏碱性;辉长-辉绿岩侵入岩墙样品的总体特征与耀岭河群基性火山岩类似;武当群以偏酸性($\text{SiO}_2 > 70\%$)和偏基性($\text{SiO}_2 < 53\%$)居多,并存在一定比例的安山质岩石,且在总体岩性特征上表现为钙碱性。武当群和耀岭河群火山岩的区别同样反映在多元素的原始地幔(Sun and McDonough, 1989)标准化图解上(图 3):武当群酸性(a)和基性(b)火山岩均显示出显著的 Nb、Ta 和 Ti 的负异常,表明其岩浆过程(岩浆源区或运移过程)有陆源物质的参与,表现出与岛弧火山岩类似的特征;而耀岭河群酸性(c)和基性(d)火山岩则无明显的 Nb、Ta 异常,但个别低 HREE 基性岩样品(如 WD36-1)具有弱 Nb、Ta 异常,可能与其侵入和结晶

① 湖北省区域地质矿产调查所, 1997. 白桑关幅、袁家山幅、习家店幅、玉堤店幅、栗子坪幅、武当山镇幅和丁家营幅区域地质调查报告(1:5万)。

表1 武当地区武当群、耀岭河群和基性侵入岩墙主量(%)和微量元素($\mu\text{g/g}$)组成

Table 1 Geochemical compositions of Wudang, Yaolinhe Gps and mafic dikes from the Wudang region

	武当群											基性侵入岩墙							
	WD07	WD08	WD09-1	WD09-3	WD09-4	WD12-1	WD12-2	WD13-1	WD13-2	WD14-1	WD14-2	WD03	WD19-1	WD21	WD22	WD23	WD25	WD26-1	WD27-1
SiO ₂	44.10	77.64	64.68	63.82	79.55	73.93	48.86	72.44	45.78	76.24	70.76	48.72	46.86	47.24	46.87	47.10	44.58	48.04	48.02
TiO ₂	1.01	0.24	0.47	0.60	0.32	0.33	0.87	0.26	0.96	0.28	0.34	2.00	1.20	1.93	1.83	1.84	1.56	2.87	2.12
Al ₂ O ₃	16.94	11.94	16.79	16.25	9.53	12.72	16.77	13.11	16.55	11.30	13.48	14.63	15.89	14.16	15.23	14.46	13.81	15.64	14.67
Fe ₂ O ₃	5.45	1.33	3.14	1.51	1.20	1.93	3.25	1.99	4.80	1.35	1.47	3.01	2.41	3.58	2.72	3.37	2.13	3.62	3.80
FeO	5.88	0.12	0.52	3.42	0.88	0.65	6.48	0.28	5.42	1.22	1.88	8.28	6.98	7.77	8.42	8.12	10.08	8.78	7.32
MnO	0.17	0.04	0.13	0.17	0.09	0.06	0.17	0.05	0.17	0.05	0.08	0.17	0.17	0.19	0.18	0.19	0.20	0.19	0.19
MgO	6.74	0.28	0.80	2.28	0.65	0.74	6.42	0.32	7.85	0.54	0.79	5.77	9.32	7.11	7.48	7.56	10.58	3.85	6.26
CaO	13.70	0.54	5.82	1.85	2.22	2.34	8.73	4.59	12.60	1.30	0.79	10.58	9.52	10.96	9.31	10.24	9.83	7.25	10.07
N ₂ O	1.45	6.79	3.20	7.15	4.09	5.82	3.62	5.00	1.78	4.07	0.79	2.43	2.11	2.05	2.17	1.94	1.70	4.16	3.18
K ₂ O	0.37	0.35	2.42	0.51	0.21	0.15	0.60	0.51	0.07	2.45	7.85	0.64	0.98	1.20	1.39	0.98	0.18	0.76	0.51
P ₂ O ₅	0.21	0.03	0.09	0.15	0.06	0.07	0.19	0.06	0.17	0.06	0.08	0.21	0.11	0.23	0.21	0.20	0.19	0.61	0.23
CO ₂	0.08	0.08	0.04	0.04	0.04	0.04	0.40	0.32	0.04	0.04	0.04	0.36	0.04	0.08	0.04	0.04	0.04	0.28	0.04
H ₂ O ⁺	3.74	0.45	1.71	2.04	0.83	1.07	3.51	0.77	3.65	0.91	1.53	3.08	4.27	3.31	3.93	3.79	4.82	3.79	3.40
LOI																			
Sum	99.84	99.83	99.81	99.79	99.67	99.85	99.87	99.70	99.84	99.81	99.88	99.88	99.86	99.81	99.78	99.83	99.70	99.84	99.81
Rb	3.76	2.74	31.6	7.29	2.50	1.55	7.35	6.87	0.395	27.1	106	7.43	16.7	15.7	19.7	14.3	1.90	11.6	4.43
Sr	271	17.1	690	135	557	121	338	315	439	70.0	33.7	314	97.9	121	107	156	110	605	276
Cs	0.122	0.128	1.45	0.385	0.137	0.049	0.246	0.278	0.013	0.600	2.03	0.298	0.520	0.444	0.433	0.413	0.123	8.49	0.248
Ba	75.9	41.7	743	70.2	43.4	40.2	108	104	16.2	653	1792	248	136	318	354	115	66.9	542	348
Ga	20.9	15.9	27.2	15.6	8.715	14.2	15.7	19.0	16.4	14.2	20.6	20.2	14.5	19.2	18.4	16.4	18.3	25.0	19.9
Y	20.1	52.7	67.1	20.2	20.1	37.3	18.6	46.2	17.6	40.4	33.3	23.9	20.9	31.5	30.8	28.0	27.2	28.9	30.3
Zr	68.0	270	310	180	143	212	64.7	201	52.2	246	233	148	77.8	130	128	114	109	276	136
Nb	2.28	8.78	7.82	5.75	4.80	6.23	2.03	8.05	1.66	15.8	15.6	12.9	1.98	4.47	4.31	3.95	3.52	35.1	6.70
Hf	1.84	7.82	8.69	4.67	3.76	5.87	1.63	5.97	1.46	7.26	6.74	3.75	2.09	3.40	3.41	2.86	2.76	6.45	3.54
Ta	0.154	0.585	0.585	0.378	0.327	0.480	0.155	0.589	0.122	1.21	1.13	0.918	0.181	0.356	0.343	0.292	0.252	2.21	0.516
Th	0.671	3.69	4.03	3.05	2.73	4.67	0.736	4.63	0.427	13.6	12.1	1.47	0.410	0.587	0.584	0.486	0.532	5.19	0.730
U	0.218	0.752	1.07	0.726	0.573	1.11	0.164	0.991	0.087	2.93	2.69	0.379	0.110	0.169	0.170	0.140	0.145	1.27	0.247
La	9.38	26.3	27.5	17.6	14.7	22.3	6.92	25.9	5.34	44.0	41.4	13.6	3.76	8.74	8.44	6.89	7.06	46.1	9.78
Ce	21.3	64.9	63.3	39.4	30.0	50.3	17.0	58.8	14.0	86.9	81.5	32.0	10.7	22.6	21.8	18.3	18.0	97.0	24.2
Pr	3.05	8.77	9.02	4.91	3.80	6.57	2.45	7.82	2.10	10.6	9.74	4.35	1.73	3.45	3.37	2.87	2.75	10.6	3.53
Nd	13.9	38.3	39.4	20.6	15.8	27.6	11.4	33.0	10.3	40.6	37.0	19.6	9.09	17.2	16.7	14.3	13.6	42.7	17.2
Sm	3.25	8.55	9.07	4.22	3.42	6.03	2.85	7.14	2.67	8.12	7.30	4.73	2.75	4.77	4.63	3.99	3.84	8.21	4.62
Eu	1.25	1.93	2.27	1.15	0.87	1.33	0.937	1.32	0.957	0.939	0.831	1.58	0.951	1.68	1.68	1.42	1.36	2.82	1.67
Gd	3.67	8.71	9.29	4.01	3.39	6.27	3.24	7.33	3.13	7.81	6.76	5.10	3.62	5.98	5.88	5.02	4.72	7.99	5.76
Tb	0.614	1.48	1.71	0.657	0.584	1.08	0.550	1.29	0.531	1.32	1.11	0.833	0.638	1.02	0.994	0.859	0.826	1.16	0.976
Dy	3.75	8.92	11.2	3.88	3.51	6.69	3.34	8.02	3.25	7.78	6.52	4.78	4.01	6.29	6.16	5.35	5.07	6.17	6.09
Ho	0.773	1.81	2.46	0.782	0.724	1.39	0.689	1.66	0.662	1.56	1.31	0.902	0.809	1.28	1.25	1.07	1.03	1.09	1.23
Er	2.24	5.33	7.79	2.30	2.14	4.16	1.94	5.01	1.90	4.58	3.98	2.41	2.29	3.62	3.54	3.03	2.95	2.86	3.50
Tm	0.329	0.812	1.21	0.347	0.329	0.631	0.287	0.764	0.272	0.686	0.615	0.337	0.326	0.525	0.506	0.435	0.428	0.369	0.512
Yb	2.14	5.38	7.95	2.34	2.23	4.22	1.87	5.09	1.78	4.49	4.13	2.07	2.13	3.31	3.26	2.79	2.76	2.26	3.29
Lu	0.322	0.847	1.26	0.370	0.356	0.683	0.293	0.810	0.271	0.702	0.639	0.304	0.328	0.511	0.503	0.48	0.431	0.339	0.505

续表 1

Table 1 continued

	基性侵入岩墙					耀岭河群														
	WD27-2	WD21D	WD30-1	WD31	WD32	WD33	WD34	WD34-1	WD35-1	WD35-1	WD35-2	WD35-3	WD35-4	WD35-5	WD35-6	WD36-1	WD36-3	WD36-4	WD37	WD38
SiO ₂	51.10	47.24	68.75	45.70	64.31	47.82	77.46	80.36	49.13	49.13	49.87	47.72	48.72	68.98	48.64	55.14	48.80	48.33	50.97	35.53
TiO ₂	2.32	1.93	0.16	2.35	0.27	3.04	0.31	0.21	3.25	3.25	3.13	2.64	3.56	3.51	2.44	1.11	2.48	2.42	2.07	3.96
Al ₂ O ₃	9.31	14.16	14.10	16.20	15.91	15.63	11.04	9.82	13.34	13.34	13.48	13.86	13.87	14.24	13.59	7.74	13.52	13.50	13.46	16.09
Fe ₂ O ₃	1.70	3.58	4.75	13.33	6.60	15.54	4.54	4.20	16.77	16.77	15.76	16.34	15.06	2.05	15.41	18.32	15.57	15.37	14.34	19.97
FeO	10.67	7.77	3.48	8.55	0.95	5.72	0.42	0.40	7.50	7.50	7.12	7.90	7.60	0.60	8.12	7.70	9.25	9.05	5.02	6.80
MnO	0.23	0.19	0.04	0.13	0.03	0.16	0.01	0.01	0.19	0.19	0.20	0.24	0.18	0.02	0.20	0.31	0.21	0.21	0.23	0.27
MgO	9.01	7.11	2.52	5.43	0.97	3.61	0.11	0.14	5.15	5.15	5.27	6.36	6.33	0.31	5.72	3.22	6.11	5.83	5.68	4.13
CaO	8.74	10.96	1.61	7.06	0.26	7.88	0.16	0.15	5.19	5.19	5.12	5.70	4.78	3.13	7.56	9.59	6.50	6.99	7.69	14.57
N ₂ O	3.08	2.05	5.89	4.83	2.69	3.55	5.85	4.81	4.85	4.85	4.66	4.53	4.97	7.07	4.24	1.04	4.26	3.93	3.03	0.44
K ₂ O	0.09	1.20	0.03	0.26	6.98	0.25	0.08	0.48	0.38	0.38	0.67	0.26	0.20	0.59	0.19	0.44	0.46	0.57	0.02	0.03
P ₂ O ₅	0.22	0.23	0.01	0.27	0.06	0.55	0.02	0.06	0.40	0.40	0.36	0.30	0.46	0.40	0.28	0.11	0.28	0.28	0.23	0.79
CO ₂	0.04	0.08																		
H ₂ O ⁺	3.30	3.31																		
LOI			2.52	5.11	1.76	2.33	0.16	0.29	1.81	1.81	1.82	2.15	2.53	0.39	1.92	2.64	2.06	2.77	2.61	3.77
Sum	99.81	99.81	100.38	100.67	99.84	100.36	99.73	100.52	100.46	100.46	100.34	100.10	100.66	100.69	100.19	99.66	100.25	100.20	100.33	99.55
Rb	0.293	16.6	0.307	3.13	125	4.63	1.25	7.68	10.1	9.64	19.0	6.85	4.86	16.7	3.78	10.7	7.35	11.1	0.447	0.468
Sr	28.7	128	72.1	489	39.5	1456	24.1	16.4	166	165	162	224	98.5	51.4	433	1325	184	531	276	578
Cs	0.044	0.468	0.012	0.148	0.694	0.052	0.027	0.169	0.126	0.127	0.221	0.113	0.109	0.175	0.071	5.26	0.428	3.39	0.046	0.022
Ba	12.6	345	7.84	132	630	92.9	10.4	18.7	71.1	67.6	151	54.1	45.8	77.8	55.3	221	213	273	12.6	32.8
Ga	10.3	20.4	24.3	20.0	49.2	23.9	28.0	28.8	22.0	22.5	21.7	21.7	23.2	14.9	21.1	18.6	21.4	20.6	20.2	30.4
Y	30.4	33.3	80.4	25.9	182	33.0	105	82.7	53.2	52.8	49.1	39.5	48.2	37.9	38.5	24.4	39.6	37.6	39.1	69.0
Zr	128	136	832	159	1216	241	1141	610	268	268	243	169	222	285	164	71.7	159	158	167	369
Nb	6.79	4.66	156	17.2	201	25.7	107	68.7	20.9	20.9	19.4	11.9	18.4	22.5	11.8	5.3	11.5	11.0	11.3	27.8
Hf	3.27	3.52	22.7	3.86	31.2	5.55	24.4	16.7	6.91	6.74	6.28	4.36	5.85	7.43	4.48	1.88	4.16	4.14	4.49	9.27
Ta	0.450	0.357	10.3	1.12	9.41	1.52	6.56	4.61	1.38	1.37	1.23	0.756	1.23	1.43	0.778	0.325	0.724	0.735	0.739	1.67
Th	0.618	0.617	17.6	1.47	19.6	2.36	20.7	18.0	2.77	2.69	2.37	1.70	2.21	2.90	1.68	0.743	1.60	1.64	1.59	3.18
U	0.182	0.183	2.57	0.355	2.13	0.580	3.00	1.50	0.591	0.596	0.548	0.430	0.491	1.44	0.412	0.225	0.402	0.380	0.400	0.897
La	8.22	8.99	153	16.3	230	26.9	33.7	123	22.8	23.1	20.1	15.0	18.1	19.8	14.8	9.11	14.8	14.5	14.1	37.2
Ce	21.0	23.6	303	37.9	441	63.4	84.6	239	52.9	52.2	47.5	35.7	44.0	44.6	35.4	17.6	34.9	34.3	33.5	92.3
Pr	3.14	3.59	33.7	5.13	47.8	8.22	8.94	28.2	7.09	7.04	6.49	4.82	6.05	6.52	4.81	2.34	4.72	4.71	4.61	12.0
Nd	15.8	17.8	123	22.3	177	35.4	37.0	108	32.4	31.3	29.7	22.5	28.2	30.1	22.4	10.9	21.8	21.4	21.3	53.1
Sm	4.48	4.98	22.6	5.46	36.0	8.19	11.5	20.4	8.69	8.45	7.67	5.83	7.62	7.59	5.88	3.04	5.53	5.56	5.86	12.2
Eu	1.14	1.73	1.87	1.30	3.83	2.58	0.917	1.17	2.24	2.13	2.10	1.74	1.98	2.13	1.66	1.32	1.60	1.74	1.63	3.01
Gd	5.56	6.20	21.3	5.04	35.7	7.21	11.7	18.3	8.70	7.71	7.60	6.03	7.25	6.90	5.87	3.29	5.84	5.67	5.65	11.3
Tb	0.957	1.05	3.20	0.843	5.99	1.08	2.46	2.73	1.50	1.43	1.31	1.06	1.35	1.22	1.02	0.587	1.05	1.08	1.09	2.00
Dy	5.90	6.50	18.0	4.92	34.5	6.17	16.1	14.8	8.96	8.91	7.99	6.65	8.22	6.97	6.38	3.56	6.38	6.45	6.45	11.8
Ho	1.19	1.32	3.60	0.972	6.89	1.15	3.58	2.96	1.90	1.82	1.69	1.39	1.74	1.45	1.42	0.818	1.44	1.38	1.41	2.60
Er	3.31	3.73	9.64	2.50	18.2	2.79	9.98	7.57	4.75	4.73	4.35	3.51	4.50	3.58	3.62	2.06	3.54	3.59	3.52	6.75
Tm	0.471	0.539	1.36	0.335	2.50	0.364	1.55	1.12	0.695	0.682	0.610	0.520	0.643	0.483	0.540	0.302	0.530	0.518	0.533	0.979
Yb	3.03	3.40	9.38	2.29	18.0	2.42	11.3	7.81	4.67	4.47	4.35	3.42	4.24	3.18	3.51	1.96	3.30	3.43	3.47	6.53
Lu	0.452	0.525	1.41	0.327	2.59	0.357	1.61	1.17	0.651	0.649	0.597	0.497	0.611	0.424	0.509	0.332	0.515	0.486	0.514	0.957

表 2 武当地区武当群、耀岭河群和基性侵入岩 Sm-Nd 同位素组成

Table 2 Sm-Nd isotopic compositions of Wudang, Yaolinhe Gps and mafic dikes from Wudang region

样号	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	ER ^a	Nd($\mu\text{g/g}$)	Sm($\mu\text{g/g}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	t_{DM} (Ga) ^b	$t_{2\text{DM}}$ (Ga) ^c	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ ^d
WD07	0.512579	4	13.61	3.291	0.1462	1.29	1.10	4.16
WD08	0.512593	4	37.50	8.259	0.1331	1.05	0.99	5.81
WD09-1	0.512658	3	40.48	8.806	0.1315	0.91	0.89	7.25
WD09-3	0.512441	4	21.10	4.371	0.1252	1.22	1.14	3.67
WD09-4	0.512550	5	16.13	3.561	0.1334	1.14	1.05	4.94
WD12-1	0.512525	4	25.97	5.753	0.1339	1.19	1.09	4.40
WD12-2	0.512583	4	12.09	3.290	0.1646	1.75	1.23	2.31
WD13-1	0.512581	4	33.91	7.876	0.1404	1.18	1.06	4.81
WD13-2	0.512693	5	10.24	2.709	0.1599	1.29	1.05	4.94
WD14-1	0.512048	5	40.31	8.274	0.1241	1.87	1.66	-3.89
WD14-2	0.512013	4	35.68	7.218	0.1223	1.89	1.69	-4.39
WD03	0.512618	4	19.40	4.826	0.1504	1.28	1.08	4.48
WD19-1	0.512887	4	9.062	2.816	0.1878	1.55	0.99	5.80
WD21	0.512684	5	17.52	5.059	0.1746	1.81	1.17	3.23
WD22	0.512703	4	16.28	4.697	0.1744	1.73	1.14	3.62
WD23	0.512675	4	14.74	4.194	0.1720	1.73	1.16	3.32
WD25	0.512665	4	13.39	3.869	0.1746	1.89	1.19	2.85
WD26-1	0.512428	4	41.08	8.615	0.1268	1.26	1.16	3.25
WD27-1	0.512691	4	15.91	4.472	0.1700	1.60	1.12	3.85
WD27-2	0.512697	4	16.31	4.751	0.1761	1.83	1.16	3.32
WD30-1	0.512386	4	117.8	22.43	0.1152	1.18	1.14	3.65
WD31	0.512621	3	21.24	5.089	0.1449	1.17	1.04	5.12
WD32	0.512348	4	180.1	30.55	0.1025	1.10	1.10	4.24
WD33	0.512587	4	36.52	8.313	0.1376	1.13	1.03	5.22
WD34	0.512659	13	39.69	11.65	0.1775	2.06	1.22	2.43
WD34-1	0.512392	5	110.6	19.52	0.1067	1.08	1.07	4.66
WD35-1	0.512656	5	31.98	8.205	0.1551	1.28	1.06	4.73
WD35-2	0.512638	5	30.25	7.753	0.1549	1.33	1.09	4.40
WD35-3	0.512595	5	22.92	6.012	0.1586	1.53	1.17	3.17
WD35-4	0.512640	4	28.43	7.549	0.1605	1.46	1.12	3.84
WD35-5	0.512625	5	27.90	7.110	0.1540	1.34	1.10	4.23
WD35-6	0.512635	5	22.18	5.773	0.1574	1.39	1.11	4.08
WD36-1	0.512588	4	11.14	2.991	0.1623	1.66	1.21	2.64
WD36-3	0.512600	5	22.26	5.815	0.1579	1.50	1.16	3.34
WD36-4	0.512636	4	21.61	5.621	0.1573	1.39	1.10	4.11
WD37	0.512669	5	21.11	5.570	0.1595	1.35	1.08	4.52
WD38	0.512290	5	54.67	12.57	0.1390	1.75	1.44	-0.7

a: 绝对误差($2\sigma_m$), 单位: 10^{-6} ; b: 按亏损地幔 4.56Ga 时 $\epsilon_{\text{Nd}}=0$ 和 0Ga 时 $\epsilon_{\text{Nd}}=+10$ 的线性演化模型计算c: $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 据南秦岭地壳丰度(Gao *et al.*, 1992)计算, 且 $t=0.82\text{Ga}$ d: $t=0.82\text{Ga}$

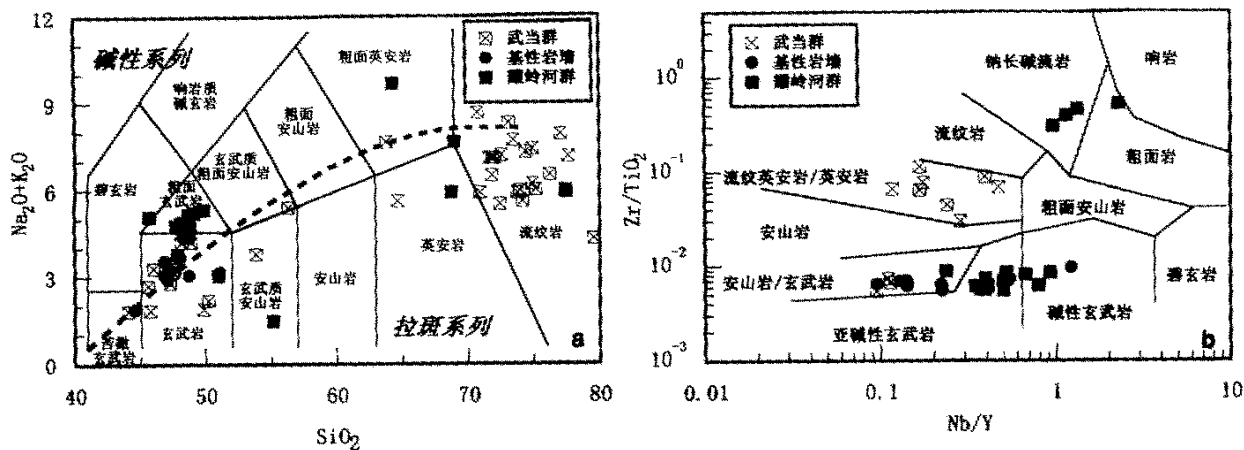


图2 武当地区元古宙岩浆岩岩性 TAS(a)和 Nb/Y vs Zr/TiO₂ 判别图

Fig. 2 Lithological discrimination plots of TAS (a) and Nb/Y vs Zr/TiO₂ (b) for Proterozoic igneous rocks from the Wudang region

过程中受地壳围岩的混染作用(AFC过程)有关,在SiO₂相近的情况下,无论酸性或基性岩石,耀岭河群火山岩的亲石大离子元素含量水平明显高于武当群火山岩,表现出与陆内裂谷岩岩类类似的特征;辉长-辉绿岩侵入岩墙的多元素地球化学特征与耀岭河群基性火山岩十分相似,而与武当群基性火山岩区别明显。

耀岭河群火山岩及辉长-辉绿岩岩墙群与武当群火山岩的差异还体现于指示其构造环境的地球化学属性。图4分别为Ta-Hf-Th(a, Wood *et al.*, 1979)和Y-Ti-Zr(b, Pearce and Cann, 1973)判别图解,耀岭河群基性火山岩和辉长-辉绿侵入岩具十分相似的分布区域,基本均落入板内拉斑质玄武岩区,而武当群基性火山岩则位于岛弧火山岩区。酸性火山岩也显示出类似的差别,在Y-Nb构造环境判别图(Pearce *et al.*, 1984)中(图5a),耀岭河群酸性火山岩落入板内花岗岩区,而武当群酸性火山岩则归入岛弧花岗岩区;在Ga/Al(×100)-Zr判别图(Whalen *et al.*, 1987)中(图5b),耀岭河群酸性火山岩主体落入A型花岗岩区,而武当群酸性火山岩则主要分布于I型或S型花岗岩区。

在Nd同位素特征上,除武当群二个(WD14-1、WD14-2)ACNK值大于1的凝灰质酸性火山碎屑岩和耀岭河群1个可能受后期变质交代作用影响(CaO高达14.57%)的基性火山岩样品(WD-38)外,其余所有样品的 ϵ_{Nd} 值均为大于1的正值(为便于统一对比,所有样品 ϵ_{Nd} 值均按820Ma计算),且样品的 ϵ_{Nd} 值与其SiO₂含量或Mg#之间缺乏明显的相关性(图略)。武当群火山岩的 ϵ_{Nd} 值为+7.25~+2.31,但数值相对发散(平均+4.70±1.37);耀岭河群火山岩及辉长-辉绿岩墙的 ϵ_{Nd} 值极为相近,分别为+2.43~+5.12(平均+4.02±0.81)和+2.85~+5.80(平均+3.75±0.90)。总体上,武当群火山岩 ϵ_{Nd} 值高于耀岭河群火山岩及辉长-辉绿岩墙。由于相当部分基性和酸性岩样品的¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd比值明

显大于或小于地壳相应比值(0.118),而不完全符合Nd同位素模式年龄计算前提,因此本文同时采用二阶段模式年龄(陈江峰和江博明,1999)方程对样品进行Nd模式年龄计算,其中研究区地壳Sm/Nd比值采用Gao *et al.* (1992)中的南秦岭地壳丰度。结果表明除样品WD14-1、WD14-2和WD-38外,所有样品的T_{2DM}值均为0.89~1.20Ga之间,显示出武当地区前震旦纪岩浆岩主体应来源于元古宙晚期地幔源区。

4 讨论

作为南秦岭重要的前震旦系基底岩系,武当群、耀岭河群及侵入其中的基性岩墙群的形成时代、构造背景与演化特征将是探讨区域大地构造性质和演化历史的重要依据。

4.1 形成时代

区内前震旦纪岩浆岩的同位素定年研究已有相当积累,且除武当群部分数据为约1.9~1.3Ga的Sm-Nd全岩年龄外,区内多数定年结果均为1.0~0.75Ga。需要指出的是,在对同位素定年结果进行分析时,须结合区域基本地质约束考虑以下因素:武当群和耀岭河群作为变火山-沉积岩地层,均存在相当规模的陆源碎屑岩和可能混有陆源物质的凝灰质火山岩(如WD14-1和WD14-2),因此用全岩等时线Sm-Nd法定年时,在一定程度上有可能形成混合线年龄;而区内部分基性侵入岩墙群样品在地球化学特征上指示出岩浆过程中已受相当程度的陆源混染(张成立等,1999);部分耀岭河群样品(WD-38)显示可能受到了后期变质交代作用的影响,同样可能导致混合线年龄。因此,应在基本地质关系的约束下,综合样品的地球化学性质和Nd同位素特征等,对同位素定年结果进行合理的判断。

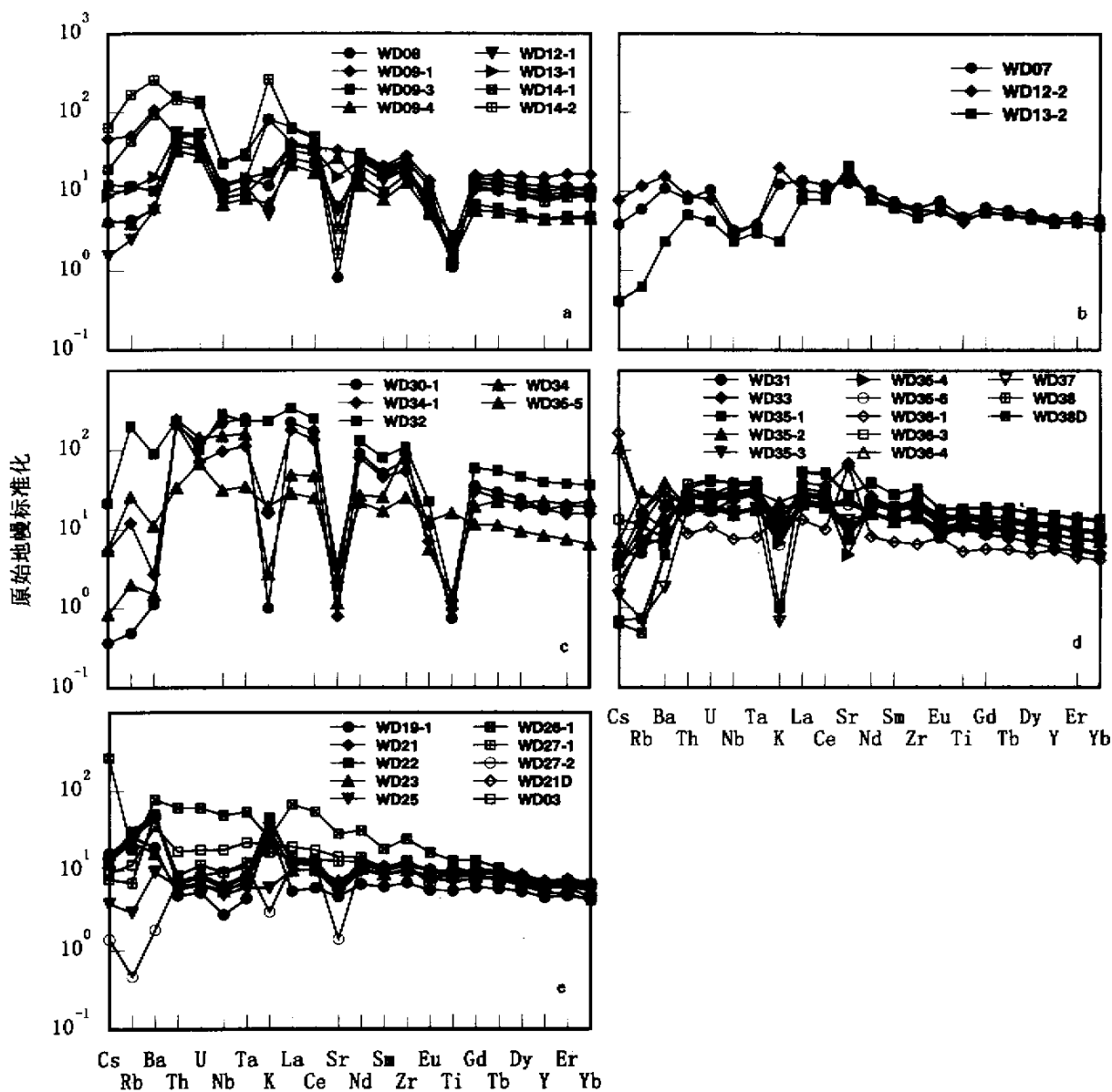


图3 武当地区元古宙岩浆岩原始地幔标准化多元素蛛网图

a. 武当群酸性火山岩; b. 武当群基性火山岩; c. 耀岭河群酸性火山岩; d. 耀岭河群基性火山岩; e. 基性岩墙群

Fig. 3 Primitive mantle-normalized spider-plot of Proterozoic igneous rocks from the Wudang region

a. felsic volcanics of Wudang Gp; b. mafic volcanics of Wudang Gp; c. felsic volcanics of Yaolinghe Gp; d. mafic volcanics of Yaolinghe Gp; e. mafic dikes

武当群火山岩有 1930~1010Ma 的多组 Sm-Nd 等时线年龄报道(张宗清等, 1996), 若将 1930Ma 带入本文样品进行计算, 多数样品 $\epsilon_{Nd}(1930Ma)$ 值大于 +10 (甚至高达 +16.6), 大大超出元古宙早期亏损地幔值。按现代亏损地幔 ϵ_{Nd} 值为 +10 的单阶段线性演化模式计算(Goldstein *et al.*, 1984), 除

两个 ACNK 值大于 1 的酸性凝灰质岩(WD14-1 和 WD14-2) 和 $^{147}Sm/^{144}Nd$ 比值大于 0.14 的变基性火山岩外, 多数样品的 T_{DM} 值约为 0.9~1.2Ga, 而按两阶段模式进行计算, 则除 WD14-1 和 WD14-2 外, 所有样品的 T_{2DM} 值为 0.89~1.2Ga。基于上述模式年龄的约束, 结合 1044~965Ma 的锆石 U-Pb

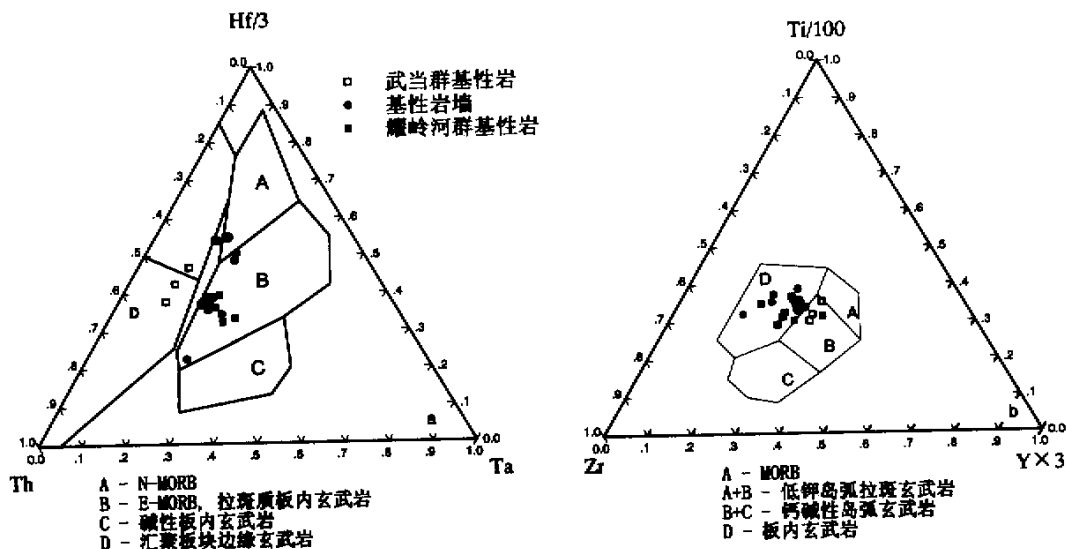


图4 武当地区元古宙岩浆岩 Ta-Hf-Th (a)和 Y-Ti-Zr (b)构造环境判别图

Fig. 4 Ternary plots of Ta-Hf-Th (a) and Y-Ti-Zr (b) for tectonic setting discriminations of Proterozoic mafic igneous rocks from the Wudang region

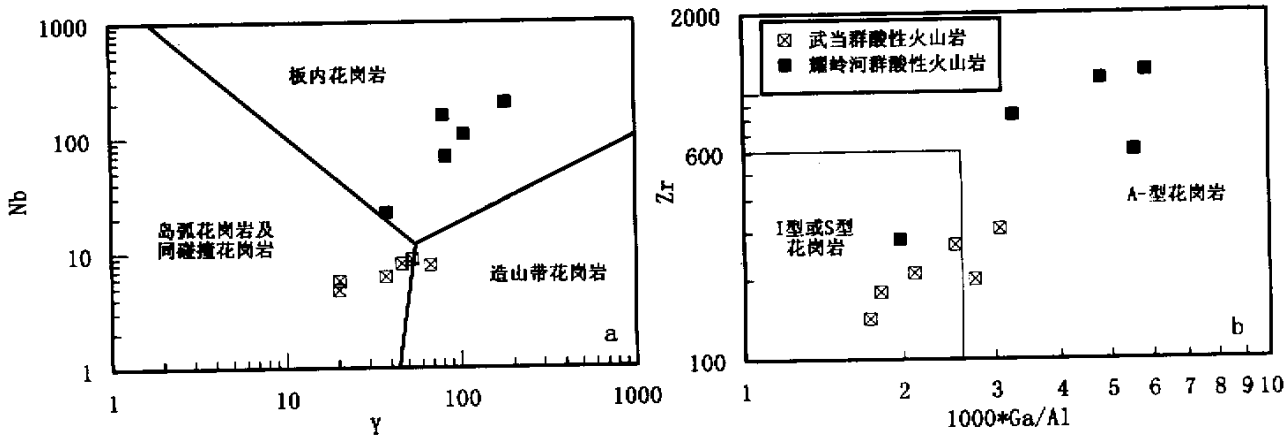


图5 武当地区元古宙酸性岩浆岩 Y-Nb (a) 和 Ga/Al(×100)-Zr (b)构造环境判别图

Fig. 5 Y vs Nb (a) and Ga/Al(×100) vs Zr (b) plots for tectonic setting discriminations of Proterozoic felsic igneous rocks from the Wudang region

同位素定年结果^①, 本文认为武当群火山岩的形成时代应为约 1.0~0.95Ga 的新元古代, 且按 $t=950\text{Ma}$ 计算得到的约 $+5.0\sim+8.3$ 的 ϵ_{Nd} 值与同时代亏损地幔值相似, 亦为佐证。值得指出, 1930Ma 的 Sm-Nd 等时线年龄与 WD14-1 和 WD14-2 凝灰质岩石的 T_{DM} 值相近 (1.87~1.89Ga), 表明南秦岭古火山-沉积盆地存在时代 \geq 约 1.9Ga 的陆缘碎屑物质, 这与位于研究区以西的南秦岭佛坪片麻岩 1853~2284Ma 的锆石 U-Pb 同位素定年结果 (王根宝, 1997) 相吻

合。与角闪岩相的佛坪片麻岩明显区别的是, 武当群变质程度仅达绿片岩相, 与耀岭河群相似, 从而以另一地质约束表明其形成时代应为元古宙晚期。

耀岭河群的同位素定年主要分布于 700~800Ma (周高

① 白桑关幅、袁家山幅、习家店幅、玉堤店幅、栗子坪幅、武当山镇幅和丁家营幅区域地质调查报告 (1:5 万), 湖北省区域地质矿产调查所, 1997, 未刊。

志等, 1996), 其中 $796 \pm 77 \text{Ma}^{\text{①}}$ 的锆石 U-Pb 年龄和 806Ma 的 Sm-Nd 全岩等时线年龄与群内变沉积岩地层中的震旦纪微古化石^① 相吻合, 并符合受震旦系覆盖和晚于武当群火山岩形成时代的地质约束。

武当地区变基性侵入岩墙群(主体侵入武当群并少量侵入耀岭河群)的形成时代显然应晚于或与耀岭河群火山岩基本同时, 并早于震旦纪。近期有 $782 \pm 164 \text{Ma}$ 的 Sm-Nd 同位素全岩等时年龄发表(周鼎武等, 1998)。基于地质接触关系的事实约束和已有的年代学信息, 耀岭河群火山岩与基性侵入岩墙群的形成时代应是基本一致的。

4.2 区域构造背景与大地构造意义

武当群火山岩具有岛弧岩浆岩的地球化学特征, 而产于火山-沉积岩地层中的两个酸性凝灰质岩样品具有 $1.87 \sim 1.89 \text{Ga}$ 的 Nd 同位素模式年龄和 $-2.69 \sim -3.15$ 的 $\epsilon_{\text{Nd}}(0.82 \text{Ga})$ 值则表明了近源陆壳物质的存在, 说明该火山岩浆作用应形成于陆缘岛弧构造环境。位于本研究区西约 200km 的扬子克拉通北缘汉南地区, 分布有时代和构造属性相似的西乡群岛弧火山岩, 同位素定年和系统地球化学研究(凌文黎等, 待刊数据)表明, 其形成时代(颗粒级锆石 U-Pb 法)为 946 ± 18 (西乡群下部白勉峡组)至 $904 \pm 18 \text{Ma}$ (西乡群上部孙家河组)的新元古代, 并具有 $+8.79 \sim +2.19$ (平均 $+4.89 \pm 1.40$) 的 $\epsilon_{\text{Nd}}(0.925 \text{Ga})$ 值, 而与武当群十分相似($\epsilon_{\text{Nd}}(0.925 \text{Ga}) = +8.13 \sim +2.78$, 平均 $+5.45 \pm 1.47$)。事实上, 在南秦岭内部陕西境内的镇安小磨岭地区也露出一套以安山质火山岩为主的火山岩-镇安磨沟峡火山岩, 该火山-沉积岩地层同样受到震旦系的覆盖, 具有 $+5.91 \sim +1.81$ 的 $\epsilon_{\text{Nd}}(0.925 \text{Ga})$ 值(平均 $+4.32 \pm 0.93$, $n=21$), 且具与武当群和西乡群相似的岛弧岩浆岩地球化学特征和 $1.0 \sim 1.2 \text{Ga}$ 的 Nd 同位素模式年龄(凌文黎等, 待刊数据)。据此, 本文认为于约 $950 \pm 50 \text{Ma}$ 的新元古代, 存在地域覆盖扬子克拉通北缘和陕西-湖北南秦岭范围的陆缘岛弧岩浆岩作用, 这不仅表明来自这些地区以北洋壳俯冲消减作用的存在, 而且显示出这一时期扬子克拉通与南秦岭属同一大陆陆块, 现今的构造单元格局应是显生宙造山作用的结果, 即南秦岭为扬子克拉通卷入秦岭显生宙造山带的部分。

耀岭河群火山岩与武当基性侵入岩墙群具有相同的大陆裂谷型岩浆地球化学特征和基本同时的岩浆喷出或侵位年龄, 两者应代表了同一岩浆过程的不同产出相。扬子克拉通北缘汉南地区火地垭群铁船山组火山岩为一典型的双峰式碱性火山岩组合, 其形成时代为 $806 \pm 14 \text{Ma}$ (颗粒级锆石 U-Pb 年龄, Ling *et al.* 待刊数据), 而同一地区以较大规模出露的望江山辉长岩岩体群亦具大陆裂谷型岩浆地球化学特征和 $785 \pm 88 \text{Ma}$ 的侵位年龄(Sm-Nd 内部等时年龄, 本文作者未刊数据), 并具有 $+2.81 \pm 5.53$ 的 $\epsilon_{\text{Nd}}(0.82 \text{Ga})$ 值(平均 $+3.97 \pm 0.87$, $n=21$)。因此, 事实上在扬子克拉通北缘和南秦岭也同时存在时代约为 $0.82 \sim 0.78 \text{Ga}$ 的大陆裂谷型岩

浆作用。相对武当群火山岩, 耀岭河群火山岩、望江山及武当地区基性侵入岩群 ϵ_{Nd} 值相对偏低, 可能暗示了其岩浆源区主体应为大陆岩石圈地幔, 而研究区东北部分布的含霓石碱性花岗岩(侵入武当群和耀岭河群, 并受震旦系覆盖), 可能为与耀岭河群和区内基性侵入岩墙群双峰式共轭的酸性岩浆岩。

综上, 扬子克拉通与南秦岭作为统一的陆块, 共同经历了于约 $1000 \sim 900 \text{Ma}$ 的洋壳俯冲消减和约 $820 \sim 780 \text{Ma}$ 陆内裂谷岩浆作用的区域构造演化过程, 所形成的裂解洋盆接受了可与扬子三峡剖面对比的震旦纪(陡山沱组 and 灯影组)沉积。值得指出的是, 扬子北缘和南秦岭从洋壳俯冲消减向陆内裂谷区域构造背景的演变, 其近 200Ma 的历时与现代板块体系下完成威尔逊旋回的周期相当, 因此是否存在因持续的洋壳俯冲消减而导致早期古洋盆的闭合乃至陆-陆碰撞造山作用(如类似于江南古陆与扬子陆块的“缝合”)将成为研究扬子克拉通前震旦纪地质历史的一个潜在重要内容。同时, 扬子与南秦岭于震旦纪和早古生代大量的被动大陆边缘型沉积作用标志着因陆内裂解而导致了新洋盆的形成, 因此扬子与南秦岭晋宁期岩浆作用的研究成果, 也将成为寻找可能由此裂解作用而分离出去的古扬子陆块和重建我国主要陆块于晋宁期(以及可能的 Rodinia 新元古代超大陆)拼合与裂解构造历史的重要线索。

5 结论

本文工作所获认识总结如下:

(1) 武当群火山岩为形成于约 $1.0 \sim 0.9 \text{Ga}$ 的新元古代陆缘岛弧火山岩, 而耀岭河群火山岩和武当地区基性侵入岩墙群为 $0.82 \sim 0.78 \text{Ga}$ 形成的大陆裂谷型同源岩浆岩;

(2) 新元古代早期的武当群与扬子克拉通北缘西乡群和南秦岭陕西境内的镇安磨沟峡火山岩在地球化学特征和时代上相似或相近, 而新元古代晚期的耀岭河群及武当基性侵入岩墙群可与扬子克拉通北缘的火地垭群铁船山组碱性火山岩和望江山基性侵入岩群相对应, 表明南秦岭与扬子克拉通北缘于晋宁期属统一的陆块, 共同经历了约 $1.0 \sim 0.9 \text{Ga}$ 洋壳俯冲消减和约 $0.82 \sim 0.78 \text{Ga}$ 陆内裂谷岩浆作用的构造演化;

(3) 沿扬子克拉通北缘和南秦岭大量的新元古代岩浆岩所具有的 $1.2 \sim 0.9 \text{Ga}$ Nd 同位素模式年龄和较高的 ϵ_{Nd} 正值等特征表明, 晋宁期构造-岩浆作用对扬子克拉通地壳增生和大陆岩石圈演化具有重要影响。

① 白桑关幅、袁家山幅、习家店幅、玉堤店幅、栗子坪幅、武当山镇幅和丁家营幅区域地质调查报告(1:5万), 湖北省区域地质矿产调查所, 1997, 未刊。

References

- Chen JF, Foland KA, Xing FM, Xu X, Zhou TX. 1991. Magmatism along the southeastern margin of the Yangtze block: Precambrian collision of the Yangtze and Cathaysia blocks of China. *Geology*, 19: 815–818
- Chen JF, Jahn BM. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Evidences from Nd and Sr isotopic compositions of rocks. *Tectonophysics*, 284:101–133
- Chen JF, Jahn BM. 1999. Nd-Sr-Pb isotopic tracing studies on the continental crustal evolution in southeastern China. In: Zheng YF (ed.) *Chemical geodynamics*. Beijing: Science Press, 262–287 (in Chinese)
- Cox KG, Bell JD, Pankhurst RJ. 1979. *The interpretation of igneous rocks*. London: Allen and Unwin, 262–287
- Gao S, Zhang BR, Wang DP, Ouyang JP, Xie QL. 1996. Geochemical evidences for the Proterozoic tectonic evolution of Qinling Orogenic Belt and its adjacent margins of the North China and Yangtze cratons. *Precamb. Res.*, 80:23–48
- Gao S, Zhang BR, Luo TC, Li ZJ, Xie QL, Gu XM, Zhang HF, Ouyang JP, Wang DP. 1992. Chemical composition of the continental crust in the Qinling Orogenic Belt and its adjacent North China and Yangtze cratons. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56: 3933–3950
- Goldstein SL, O’Nions RK, Hamilton PJ. 1984. A Sm-Nd isotopic study of atmospheric dust and particulates from major river systems. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 70: 221–236
- Li SG, Liu DL, Chen YZ, Zhang GW, Zhang ZQ. 1991. A chronological table of the major tectonic events for Qinling-Dabie orogenic belt and its implications. In: Yie LJ, Qian XL, Zhang GW (eds.). *A selection of papers presented at the conference on the Qinling orogenic belt*. Xi’an: Publishing House of Northwest University, 229–237 (in Chinese with English abstract)
- Li XH. 1996. Nd isotopic evolution of the sedimentary rocks from the south margin of Yangtze Block and its tectonic significances. *Acta Petrologica Sinica*, 12(3): 359–369 (in Chinese with English abstract)
- Li XH. 1999. U-Pb zircon ages of granites from the southern margin of the Yangtze block; timing of the Neoproterozoic Jinning Orogeny in SE China and implications for Rodinia assembly. *Precamb. Res.*, 97: 43–57
- Ling WL, Gao S, Zheng HF, Zhou L, Zhao ZB. 1998. An Sm-Nd isotopic study of the Archean Kongling complex in the Huanling area of the Yangtze craton. *Chinese Sci. Bull.* 43(14): 1187–1190
- Lu SN, Yang CL, Jiang MM, Li HK, Li HM. 1996. Tracing studies on the Precambrian evolution of the continental crust. Beijing: Geological Publishing House, 156 (in Chinese)
- Meng QR, Zhang GW. 2000. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, central China, *Tectonophysics*, 323: 183–196
- Pearce JA, Cann JR. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 19: 290–300
- Pearce JA, Harris NBW, Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.* 25:956–983
- Qi L, Hu J, Gregoire DC. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Talanta*, 51: 507–513
- Sun SS, McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ(eds.). *Magmatism in the ocean basins*. *Geol. Soc. Spec. Pub.*, No. 42: 528–548
- Wang GB. 1997. Isotopic chronology and its geological significances of Fuping gneisses, South Qinling. *Northwest Geoscience*. 18(2): 21–25 (in Chinese with English abstract)
- Whalen JB, Currie KL, Chappell BW. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 95: 407–419
- Winchester JA, Floyd PA. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chem. Geol.*, 20: 325–343
- Wood DA, Joron JL, Treuil M. 1979. A re-appraisal of the use of trace elements to classify and discriminate between magma series erupted in different tectonic settings. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 45: 326–336
- Xing FM, Xu X, Cheng JF, Zhou TX, Foland K. 1992. Neoproterozoic accretion of continental crust along the southeastern margin of Cathaysia. *Acta Geologica Sinica*, 66:59–72 (in Chinese with English abstract)
- Zhang BR, Zhang HF, Zhao ZD, Ling WL. 1996. Geochemical regional division, evolution and their tectonic significance of the lithosphere in East Qinling and its adjacencies. *Science in China (Series D)*. 26(3): 201–208(in Chinese)
- Zhang CL, Zhou DW, Jing HL, Han S, Liu YY. 1999. Sr-Nd-Pb-O isotopic studies of Wudang mafic swarms and Yaolinghe volcanics from the Wudang block. *Acta Petrologica Sinica*, 15(3): 430–437 (in Chinese with English abstract)
- Zhang CL, Zhou DW, Liu YY. 1998. Geochemistry and its tectonic implication of the mafic swarms from Wudang block. *Geochimica*, 28(2): 126–135(in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Meng QR, Lai SC. 1995. Tectonics and structures of the Qinling orogenic belt. *Sci. Sinica*, B38: 1379–1386.
- Zhang GW, Zhang ZQ, Dong YP. 1995. Tectonic features and significances of the major petro-tectonic units in Qinling orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 11(2): 101–114(in Chinese with English abstract)
- Zhang LG. 1995. Geology of lithosphere blocks in East Asia: isotopic geochemistry and geodynamics of upper mantle, basement

and granite. Beijing: Science Press, pp252 (in Chinese with English contents and abstract)

Zhang ZQ, Zhang GW, Fu GM, Tang SH, Song B. 1996. Chronology and tectonic significance of the meta-strata in Qinling orogenic belt. *Science in China (Series D)*, 26(3): 216—222 (in Chinese)

Zhou DW, Zhang CL, Liu L, Wang JL, Liu YY, Zhang ZQ. 1998. Sm-Nd dating of the Wudang mafic swarm and its explanation. *Acta Geoscientia Sinica*, 19(1):25—30

Zhou DW, Zhang GW. 1991. A re-subdivision of "Qinling Group" and the Jinning Event recorded in Qinling orogenic belt. In: Yie LJ, Qian XL, Zhang GW. (eds.). A selection of papers presented at the conference on the Qinling orogenic belt. Xi'an: Publishing House of Northwest University. 15—25 (in Chinese with English abstract)

Zhou GZ, Liou JG, Liu YJ. 1996. HP and UHP metamorphic belts in northern Hubei Province, China. Wuhan: China University of Geosciences Press, 242pp (in Chinese with English preface, contents and abstract)

Zhou XM, Zhu YH. 1993. Prototectonic evidences on the later Proterozoic collision orogene and suture in southeastern China. In: Li JL (ed.) Construction and geological evolution of the continental lithosphere in southeastern China. Beijing: Metallurgical Publishing House, 87—97 (in Chinese with English abstract)

Zhu BQ. 1998. Study on chemical heterogeneities of the mantle-crust system and geochemical boundaries of blocks. *Earth Science Frontiers*. 5(1): 72—82 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈江峰, 江博明. 1999. 钕、锶、铅同位素示踪和中国东南大陆地壳演化. 见: 郑永飞主编. 化学地球动力学. 北京: 科学出版社, 262—287

李曙光, 刘德良, 陈移之, 张国伟, 张宗清. 1991. 秦岭—大别造山带主要构造事件同位素年表及其地质意义. 见: 叶连俊, 钱祥麟, 张国伟主编. 秦岭造山带学术讨论会论文集. 西安: 西北大学出版社, 229—237

李献华. 1996. 扬子南缘沉积岩的 Nd 同位素演化及其大地构造意

义. 岩石学报, 12(3): 359—369

凌文黎, 高山, 郑海飞, 周炼, 赵祖斌. 1998. 扬子克拉通黄陵地区崆岭杂岩 Sm-Nd 同位素地质年代学研究. *科学通报*, 43(1): 86—89

陆松年, 杨春亮, 蒋明媚, 李怀坤, 李惠民. 1996. 前寒武纪大陆地壳演化示踪. 北京: 地质出版社, 156pp

王根宝. 1997. 南秦岭佛坪片麻岩系同位素年代学及其地质意义. *西北地质科学*, 18(2): 21—25

邢凤鸣, 徐祥, 陈江峰, 周泰禧, Foland K. 1992. 江南古陆东南缘新元古代大陆增长史. *地质科学*, 66: 59—72

张本仁, 张宏飞, 赵志丹, 凌文黎. 1996. 东秦岭及邻区壳、幔地球化学分区和演化及其大地构造意义. *中国科学(D 辑)*, 26(3): 201—208

张成立, 周鼎武, 金海龙, 韩松, 刘颖宇. 1999. 武当地块基性岩墙群及耀岭河群基性火山岩的 Sr、Nd、Pb、O 同位素研究. *岩石学报*, 15(3): 430—437

张成立, 周鼎武, 刘颖宇. 1998. 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

张国伟, 张宗清, 董云鹏. 1995. 秦岭造山带主要岩石构造地层单元的构造性质及其大地构造意义. *岩石学报*, 11(2): 101—114

张理刚. 东亚岩石圈块体地质—上地幔、基底和花岗岩同位素地球化学及其动力学. 1995, 北京: 科学出版社, 252pp

张宗清, 张国伟, 付国民, 唐索寒, 宋彪. 1996. 秦岭变质地层年龄及其构造意义. *中国科学(D 辑)*, 26(3): 216—222

周鼎武, 张国伟. 1991. “秦岭群”的再解体和秦岭造山带中的晋宁运动. 见: 叶连俊, 钱祥麟, 张国伟主编. 秦岭造山带学术讨论会论文集. 西安: 西北大学出版社, 15—25

周鼎武, 张成立, 刘良, 王居里, 刘颖宁, 张宗清. 1998. 武当地块基性岩墙群的 Sm-Nd 定年及其相关问题讨论. *地球学报*, 19(1): 25—30

周高志, Liou JG, 刘源骏. 1996. 湖北北部高压-超高压变质带. 武汉: 中国地质大学出版社, 242pp

周新民, 朱云鹤. 1993. 中国东南部晚元古代碰撞造山带与地缝合带的岩石学证据. 见: 李继亮主编. 东南大陆岩石圈结构与地质演化. 北京: 冶金工业出版社, 87—97

朱炳泉. 1998. 壳幔化学不均一性与块体地球化学边界研究. *地学前缘*, 5(1): 72—82