

Nd、Sr 同位素组成对中国大陆科学钻探工程主孔 0 ~ 2000 米片麻岩原岩成因的制约*

薛怀民 刘福来

XUE HuaiMin and LIU FuLai

中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2007-07-12 收稿, 2007-09-22 改回

Xue HM and Liu FL. 2007. Nd-Sr isotopic constraints on the protoliths of the gneisses from the 100 ~ 2000 m main hole of the Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Acta Petrologica Sinica*, 23(12):3231-3238

Abstract Granitic gneiss and plagiogneiss are the predominant rock types in the main hole of the Chinese Continental Scientific Drilling Project (CCSD-MH). Present-day $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of these gneisses are obviously supported by Rb, which can be ascribed to add of Rb after the granite intrusion, implying the Rb-Sr systems were highly disturbed during ultrahigh-pressure metamorphism and/or subsequent retrograde metamorphism. On the other hand, the Sm-Nd isotopic systems have not been reset during the entire process of subduction and exhumation of the continental rocks and can be used to constraint on the nature of the protoliths. The granitic gneisses have low and narrow ranges of $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values (-8.2 to -13.0), their Nd model ages from 2.25 to 2.54 Ga, much older than the emplacement ages of their protoliths, indicating their protoliths were probably formed as partial melting of Paleoproterozoic crust rocks in Neoproterozoic. The plagiogneisses in the CCSD-MH have a wide range of $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values, from +1.3 to -9.4. The samples from the mass plagiogneiss part (the second petrological segment) show a wide range of $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values (-3.0 to -9.4), their Nd model ages from 2.25 to 2.54 Ga, similar with the T_{DM} values of the granitic gneisses. The geochemical characteristics of the plagiogneisses are similar with those of the acidite end-member (rhyolitic pyroclastic rocks) of the Neoproterozoic bio-model volcanic rocks remained in the northern margin of the Yangtze Craton, indicat partial melting of "old but heterogeneous crust sources" caused by basaltic magma from upper mantle, with some mantle material input. Whereas the plagiogneisses as thin layers in metamorphic mafic host have near-chondritic $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values ($\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +1.3 \sim -2.6$), similar to or slightly lower than that of the eclogite and amphibolite, indicating a genetic relationship between the protoliths of the plagiogneisses and the metamorphic mafic host or implying that the plagiogneisses were retrograded directly from the eclogites. Their model ages ($T_{\text{DM}} = 1.28 \sim 1.60$ Ga) are slight older than the emplacement ages of their protoliths, but much later than the T_{DM} Values of the granitic gneisses and the mass plagiogneiss. We tend to think that they was derived from the basaltic magma accompany some degree of crustal contamination during the magma differentiation.

Key words Granitic gneiss; Plagiogneiss; Geochemistry; Nd-Sr isotopes; Chinese Continental Scientific Drilling Project

摘要 中国大陆科学钻探工程主孔 0 ~ 2000 米岩芯段的片麻岩包括二长花岗质片麻岩和斜长片麻岩两类, 其中的 Sr 同位素组成与元素 Rb 的丰度关系显示原岩侵位后发生过强烈的 Rb 加入事件, 说明 Rb-Sr 同位素体系在超高压变质和随后的退变质作用过程中受到了明显的扰动。相反, Sm-Nd 同位素体系尚保持着封闭状态, 可有效地示踪原岩的成因。二长花岗片麻岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值较低, 变化范围也不大 (-8.2 ~ -13.0), 它们的 Nd 同位素模式年龄 (T_{DM}) 主要介于 2.25 到 2.54 Ga 之间, 远大于其原岩的实际侵位年龄, 指示其原岩可能是由古元古代的地壳物质在新元古代部分熔融形成的。而斜长片麻岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化范围广, 从 +1.3 到 -9.4。其中采自大套斜长片麻岩段的样品其 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值从 -3.0 到 -9.4, 它们的 Nd 同位素模式年龄介于 2.1 ~ 2.4 Ga, 与二长花岗片麻岩的 T_{DM} 值类似, 该类岩石的地球化学特征总体类似于扬子地台北缘新元古代双峰式火山岩的酸性端元, 指示它们的原岩可能是在新元古代由地幔来源的玄武岩浆上升到地壳层位, 引起成分不均一的古元古代地壳物质发生部分熔融形成的, 其中可能混入了少量地幔来源的物质。而采自变镁铁质岩“夹层”中的斜长片麻岩显示出接近球粒陨石的 Nd 同位素特征 ($\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +1.3 \sim -2.6$), 类似或略低于邻近的榴辉岩和斜长角闪岩围岩的 Nd 同位素组成及

* 本文为国家重点基础研究发展规划项目“973”(编号 2003CB716502)、国家自然科学基金重大项目(编号 40399143)和中国地质调查局地质大调查项目(121201056606)资助成果。

第一作者简介: 薛怀民, 男, 1962 年生, 研究员, 主要从事岩石学与地球化学研究工作, E-mail: huaiminx@sina.com

大别山-苏鲁造山带内大多数榴辉岩的 Nd 同位素组成,指示它们与这些变镁铁质岩之间可能有成因联系。它们的 Nd 同位素模式年龄($T_{DM} = 1.28 - 1.60$ Ga)虽然早于其原岩的侵位年龄,但明显小于花岗岩片麻岩及大套斜长片麻岩的 T_{DM} 值。我们倾向于认为这些“薄层”状的斜长片麻岩的原岩是由玄武岩浆派生的,伴有一定程度的地壳混染。

关键词 花岗片麻岩;斜长片麻岩;Nd-Sr 同位素;中国大陆科学钻探工程

中图法分类号 P542; P595

秦岭-大别山-苏鲁造山带是已知世界上规模最大的超高压变质带,一般认为主要是由扬子克拉通基底在三叠纪向北俯冲到华北克拉通之下,随后从深度大于 120 km (Liou *et al.*, 1996),甚至大于 200 km (Ye *et al.*, 2000) 的深处折返上来形成的。作为榴辉岩的主要围岩,片麻岩在大别山-苏鲁造山带内广泛分布,从它们的原岩属性上主要分为两类:一类一般认为是由新元古代的花岗岩类深成侵入体变质而来的,习惯称之为正片麻岩或花岗片麻岩,岩性包括奥长花岗质、二长花岗质、正长花岗质、花岗闪长质、英云闪长质等多种类型;另一类一般认为是由表壳岩变质而来的,习惯称之为副片麻岩,以黑云斜长片麻岩为主,其次为钙硅酸盐片麻岩。当然,近年来的研究成果表明,绝大多数被认为是由表壳岩变质而来的片麻岩其原岩并非典型的沉积岩(薛怀民和刘福来,2005),对于这些片麻岩我们将在以后的表述中不用“副片麻岩”而直接用斜长片麻岩。

通过国内外学者将近 20 年的研究,对于该造山带超高压变质作用的年代学、矿物学、构造与折返模式,尤其是有关榴辉岩的研究已取得了大量成果,但有关片麻岩地球化学方面的研究则相对较少,有限的研究也主要限于花岗质片麻岩类(Zhai *et al.*, 1994; 郑祥身等, 1999, 2000; Xue *et al.*, 2001; 刘福来等, 2004a; 薛怀民等, 2006),涉及到“副片麻岩”地球化学与原岩性质的研究仅见有一篇(薛怀民和刘福来,2005),尽管这些“副片麻岩”往往是造山带内榴辉岩透镜体或团块的直接围岩。本文的目的是研究主孔 0~2000 米岩芯段不同类型片麻岩的 Sr-Nd 同位素组成,并结合元素地球化学性质,示踪它们的原岩成因。

1 区域地质

苏鲁地块位于秦岭-大别山造山带的东延部分,并被左旋的郯庐断裂向北错断达 530 km 以上(Okay *et al.*, 1993; Hacker *et al.*, 1996, 2000)。构造上,苏鲁地块可进一步分为南部的高压变质带和北部的超高压变质带两个单元(如刘福来等,2004b)。中国大陆科学钻探工程主孔就位于北部的超高压变质单元内。

主孔所在江苏东海地区的超高压变质岩除在几个孤立的小山上有所出露外,几乎全被第四纪不整合覆盖,但众多勘探金红石矿和铬铁矿的钻孔资料揭示榴辉岩在区内的分布很广。这些榴辉岩体呈豆荚状或透镜状赋存在正片麻岩或表壳岩中,且往往成群集中排列,延长方向平行于区域构

造线的走向及片麻岩围岩的片理方向。部分榴辉岩体与片麻岩围岩一起发生了褶皱变形。

2 主孔中片麻岩的分布与岩石学特征

主孔内的岩性总体与大别山-苏鲁造山带内地表出露的岩石组合类似,也以各种类型的片麻岩占绝对优势,其次是榴辉岩、斜长角闪岩、退变榴辉岩及超基性岩。但片麻岩的类型相对较简单,其中正片麻岩均为二长花岗质,而副片麻岩主要为黑云斜长片麻岩,未出现钙硅酸盐片麻岩。有关主孔 0~2000 m 的岩性剖面,已有多个学者进行过描述(如许志琴,2004; 刘福来等,2004a)。根据占支配地位的岩石类型,可简单地分为 4 个岩性段:第一岩性段(0~738 m)主要由榴辉岩、退变榴辉岩和斜长角闪岩组成,含薄的斜长片麻岩“夹层”。另外在该岩性段下部有层厚约 70 米的超镁铁岩体;第二岩性段(738~1113 m)主要由绿帘黑云斜长片麻岩构成,夹少量的榴辉岩(或退变榴辉岩)、斜长角闪岩、正片麻岩及蛇纹石化超镁铁岩;第三岩性段(1113~1596 m)主要由花岗片麻岩组成,含少量斜长片麻岩和斜长角闪岩“夹层”;第四岩性段(1596~2000 m)主要由榴辉岩、退变榴辉岩和斜长角闪岩组成,含斜长片麻岩和二长花岗片麻岩“薄层”(参见图 1)。概括起来,主孔中斜长片麻岩的产出形式主要有两种:一是呈大套出现(第二岩性段),仅有少量的其它岩石“夹层”;另一种则是以薄的“夹层”存在于其它类型的岩石中。花岗片麻岩的产出形式也有两种:一种也是呈大套出现(第三岩性段),另一种也是以薄的“夹层”存在于其它类型的岩石中。

主孔中的二长花岗片麻岩,主要由钾长石、斜长石和石英组成,次要矿物包括绿帘石、黑云母、角闪石、石榴石、多硅白云母和磁铁矿等。颜色由浅灰到粉红色,中粒到粗粒结构,多具清晰的片麻状构造,有时见钾长石变斑晶组成的眼球状构造。而斜长片麻岩以绿帘黑云斜长(钠长)片麻岩为主,主要由黑云母、绿帘石、斜长石和石英组成,含少量的钾长石、石榴石、角闪石、多硅白云母和钛铁矿等。该类岩石的结构明显较正片麻岩细,为细粒到中粒结构。斜长片麻岩中的片麻矿物普遍比花岗片麻岩中多,因而片麻理往往表现得 clearer。两类岩石均表现为角闪岩相矿物组合,但保存在锆石微区的柯石英或含柯石英的超高压矿物组合(刘福来等,2004a),指示它们曾经历过超高压变质作用,目前所表现的是超高压岩石折返过程中退变质的产物。

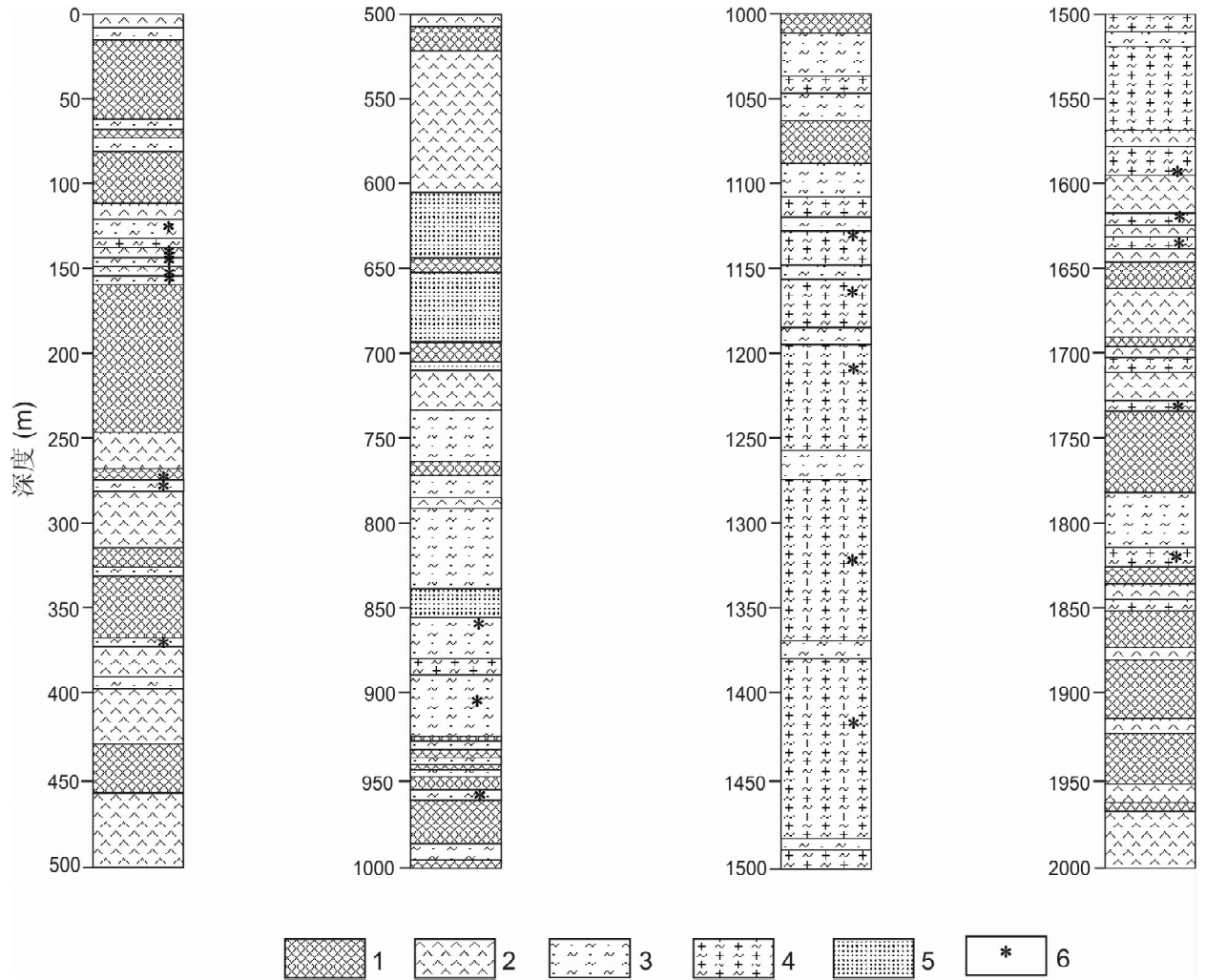


图1 中国大陆科学钻探工程主孔 0~2000 m 岩性简化柱状剖面

1-榴辉岩; 2-斜长角闪岩或退变榴辉岩; 3-斜长片麻岩; 4-花岗片麻岩; 5-超基性岩; 6-采样位置

Fig.1 Simplified columnar lithological profile of 0~2000 m in the main drilling hole, Chinese Continental Scientific Drilling Project

1-eclogite; 2-plagioclase amphibolite; 3-plagioclase gneiss; 4-granitic gneiss; 5-ultramafic rock; 6-sample location

3 不同类型片麻岩的地球化学特征概况

3.1 斜长片麻岩

主孔内的斜长片麻岩从地球化学上大致可归为两类: 主体表现为较高的稀土元素总量和较强的轻、重稀土元素分馏程度, 尤以一定程度的负 Eu 异常为特征(图 2a)。它们在不相容元素原始地幔标准化图解上, 表现为强烈的 Sr 负异常, 且大多数样品同时强烈亏损高场强元素 Nb、Ta 和 Ti, Ba 总体呈正异常, 但 Zr、Hf 异常不明显(图 2b)。该类岩石稀土元素球粒陨石标准化曲线的形状和不相容元素原始地幔标准化蛛网图与现残存的扬子地台北缘新元古代双峰式火山岩的酸性端元非常相似(图 2a, b), 也许意味着它们的原岩

类似于这些酸性火山碎屑岩。各样品间重稀土元素含量和标准化曲线的形状相似, 只是轻稀土元素含量有所变化。这一方面说明这些片麻岩的原岩性质差别不大, 同时表明超高压变质作用过程中轻稀土元素可能有一定的活性。

少量作为变镁铁岩中“夹层”的斜长片麻岩具较低的稀土元素总量、较弱的轻、重稀土元素分馏程度, 尤以明显的正 Eu 异常为特征而明显不同于大多数斜长片麻岩(比较图 2c 与图 2a)。在不相容元素原始地幔标准化图解上, 这些片麻岩中高场强元素 Nb、Ta 与 Zr、Hf 发生分离, 表现出强烈亏损 Nb、Ta, 而 Zr、Hf 则具明显的正异常, 强烈的 Ba 正异常和 Sr 无异常为特征(图 2d)。该特征与相邻的斜长角闪岩很相似, 意味着它们可能是由榴辉岩经斜长角闪岩转变而来。

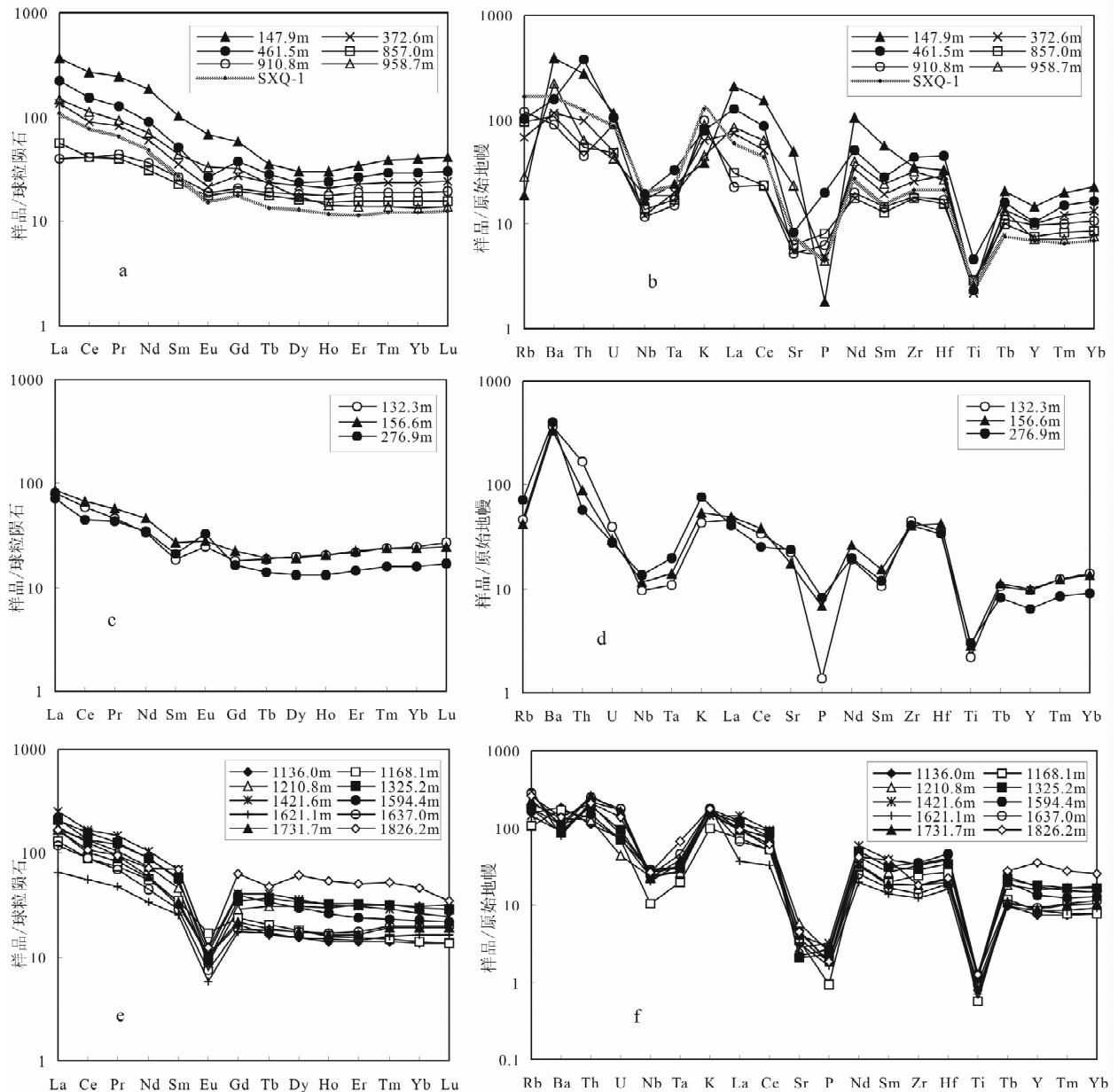


图2 主孔0~2000 m片麻岩的稀土元素球粒陨石标准化曲线和不相容元素原始地幔标准化蛛网图

扬子地台北缘晚元古代酸性火山碎屑岩资料(SXQ-1)据薛怀民和刘福来(2005),球粒陨石数值据 Boynton, 1984,原始地幔数值据 McDonough & Sun, 1995。a、b分别为大套斜长片麻岩的稀土配分模式图和微量元素蛛网图;c、d分别为薄夹层状斜长片麻岩的稀土配分模式图和微量元素蛛网图;e、f分别为花岗片麻岩的稀土配分模式图和微量元素蛛网图

Fig. 2 Chondrite normalized REE patterns and primitive mantle normalized trace element spider diagrams for paragneisses from depth 0 to 2000 m in the main drilling hole, Chinese Continental Scientific Drilling Project

3.2 花岗片麻岩

主孔中花岗片麻岩的成分与斜长片麻岩的差别明显,因而一些地球化学图解易于将它们明确区分开(薛怀民和刘福来,2005)。这些花岗片麻岩的稀土元素配分模式很相似,均表现为较强的轻、重稀土元素分馏程度和强的负Eu异常

(图2e)。在不相容元素原始地幔标准化图解上,均表现为强的Sr负异常、明显的Nb、Ta、P和Ti负异常(图2f)。该花岗片麻岩除靠近斜长片麻岩部位(1130~1168.1 m)外都显示强的Ba负异常。主孔中所有的花岗片麻岩均表现出一致的Eu和Sr负异常,可能指示它们的母岩浆演化过程中存在着斜长石的分离结晶。

表 1 主孔 0 ~ 2000 米片麻岩的 Rb - Sr 和 Sm - Nd 同位素组成

Table 1 Rb - Sr and Sm - Nd isotopic compositions of gneisses from the CCSD - MH

采样深度 (m)	岩性	Sr ($\mu\text{g/g}$)	Rb ($\mu\text{g/g}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm 2\sigma$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	Sm ($\mu\text{g/g}$)	Nd ($\mu\text{g/g}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(750)$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	T_{DM} (Ga)
132.3	斜长片麻岩	479.5	31.68	0.1895	0.708023 \pm 14	0.705922	4.476	25.92	0.1045	0.512234 \pm 15	-7.9	1.0	-0.47	1.28
142.6	斜长角闪岩	360.5	63.03	0.5030	0.707965 \pm 13	0.702389	15.02	90.23	0.1008	0.512220 \pm 13	-8.2	1.0	-0.49	1.26
146.2	榴辉岩	139.9	14.39	0.2952	0.707154 \pm 13	0.703881	7.212	28.84	0.1514	0.512374 \pm 10	-5.1	-0.8	-0.23	1.90
147.9	斜长片麻岩	1041	14.80	0.0408	0.706072 \pm 15	0.706268	23.85	138.8	0.1040	0.512212 \pm 11	-8.3	0.6	-0.47	1.30
155.1	榴辉岩	218.6	17.48	0.2296	0.706675 \pm 15	0.704130	8.908	38.02	0.1418	0.512343 \pm 14	-5.8	-0.5	-0.28	1.71
156.6	斜长片麻岩	363.4	36.59	0.2880	0.707067 \pm 13	0.703874	4.654	24.38	0.1156	0.512306 \pm 10	-6.5	1.3	-0.41	1.31
275.3	榴辉岩	181.0	33.30	0.5292	0.707760 \pm 14	0.701893	7.564	28.29	0.1619	0.512367 \pm 07	-5.3	-2.0	-0.18	2.30
276.9	斜长片麻岩	490.5	46.49	0.2718	0.706876 \pm 17	0.703863	5.262	25.81	0.1234	0.512260 \pm 14	-7.4	-0.3	-0.37	1.50
372.6	斜长片麻岩	115.6	46.93	1.1620	0.712213 \pm 13	0.699331	8.279	44.17	0.1135	0.512098 \pm 13	-10.5	-2.6	-0.42	1.60
857.0	斜长片麻岩	127.9	57.52	1.2981	0.714341 \pm 16	0.699950	5.201	20.67	0.1523	0.512169 \pm 16	-9.1	-4.9	-0.23	2.43
910.8	斜长片麻岩	107.6	73.77	1.9647	0.715839 \pm 13	0.694058	5.971	24.64	0.1467	0.512237 \pm 15	-7.8	-3.0	-0.25	2.07
958.7	斜长片麻岩	474.1	18.28	0.1106	0.708717 \pm 14	0.707491	9.866	49.68	0.1202	0.511782 \pm 13	-16.7	-9.4	-0.39	2.22
1136.0	花岗片麻岩	95.50	93.42	2.8229	0.733569 \pm 15	0.702274	7.893	44.21	0.1081	0.511562 \pm 13	-21.0	-12.5	-0.45	2.28
1168.1	花岗片麻岩	73.99	67.08	2.6181	0.740024 \pm 14	0.711000	9.188	46.36	0.1200	0.511727 \pm 11	-17.8	-10.4	-0.39	2.31
1210.8	花岗片麻岩	117.3	124.1	3.0516	0.727784 \pm 12	0.693954	11.88	56.14	0.1281	0.511883 \pm 11	-14.7	-8.2	-0.35	2.25
1325.2	花岗片麻岩	40.20	105.1	7.5511	0.781798 \pm 11	0.698081	14.36	67.54	0.1287	0.511856 \pm 09	-15.3	-8.8	-0.35	2.31
1421.6	花岗片麻岩	56.22	85.58	4.4075	0.747893 \pm 15	0.699031	18.18	85.98	0.1280	0.511837 \pm 11	-15.6	-9.1	-0.35	2.33
1594.4	花岗片麻岩	42.80	103.9	7.0446	0.752124 \pm 14	0.674028	14.14	67.99	0.1259	0.511810 \pm 12	-16.2	-9.4	-0.36	2.32
1621.1	花岗片麻岩	65.09	184.4	8.2128	0.755138 \pm 11	0.664091	6.167	25.59	0.1459	0.511729 \pm 09	-17.7	-12.9	-0.26	3.17
1637.0	花岗片麻岩	72.43	164.3	6.6032	0.758083 \pm 12	0.684880	6.834	34.09	0.1213	0.511602 \pm 12	-20.2	-13.0	-0.38	2.54
1731.7	花岗片麻岩	83.84	138.9	4.8124	0.745357 \pm 14	0.692007	7.763	42.87	0.1096	0.511553 \pm 12	-21.2	-12.8	-0.44	2.33
1826.2	花岗片麻岩	93.95	158.9	4.9281	0.756459 \pm 12	0.701826	16.83	54.04	0.1885	0.511968 \pm 11	-13.1	-12.3	-0.04	*

$$f_{\text{Sm}/\text{Nd}} = \left(\frac{^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Sm}}{^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Sm}} \right)_{\text{样品}} / \left(\frac{^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Sm}}{^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Sm}} \right)_{\text{球粒陨石}} - 1$$

$$\left(\frac{^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}}{^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}} \right)_{\text{球粒陨石}} = 0.512638, \quad \left(\frac{^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Sm}}{^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Sm}} \right)_{\text{球粒陨石}} = 0.1967$$

$$\left(\frac{^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}}{^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}} \right)_{\text{亏损地幔}} = 0.513151, \quad \left(\frac{^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Sm}}{^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Sm}} \right)_{\text{亏损地幔}} = 0.2134$$

4 Sr、Nd 同位素组成

4.1 样品与分析方法

本文所研究的斜长片麻岩主要采自第一岩性段的薄“夹层”,其次采自第二岩性段的大套斜长片麻岩中。花岗片麻岩则主要采自第三岩性段的大套花岗片麻岩中,部分采自第四岩性段的薄“夹层”。具体的采样位置和深度见图1和表1。为对比起见,同时分析了部分榴辉岩和斜长角闪岩的Nd、Sr同位素组成。

Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素是在中国科学院地质与地球物理研究所同位素实验室分析的,分析流程及实验条件与 Cohen *et al.* (1988)、Chavagnac and Jahn (1996) 及 Jahn *et al.* (1996) 所描述的类似。分析结果及主要参数见表1。

4.2 分析结果

本文共对10个花岗片麻岩、8个斜长片麻岩和4个变镁铁质岩进行了Sr、Nd同位素组成分析。Sr和Nd同位素初值是以 $t = 750$ Ma 计算获得的,这是因为大量的年代学研究成果显示,造山带内超高压变质杂岩的原岩主要形成于700~800 Ma 的新元古代(如 Ames *et al.*, 1996; Rowley *et al.*, 1997; Xue *et al.*, 1997; Hacker *et al.*, 1998, 2000; 薛怀民等, 2002)。

表中可见,花岗片麻岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 现在值普遍较高且变化范围很广,从0.7278到0.7818,但大多数样品计算所获得的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初时值却很低且变化范围很广,这主要是由它们异常高的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比造成的。相反,花岗片麻岩的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 现在值的变化范围较小,从0.511553到0.511968。它们的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值除个别样品较高外,主要集中在0.12左右,类似于上地壳的比值(0.118, Taylor & McLennan, 1985)。计算所得到的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值较低,变化范围也不大(-8.2~-13.0)。这些花岗片麻岩样品的Nd同位素模式年龄(T_{DM})主要介于2.25到2.54 Ga之间,远大于其原岩的实际侵位年龄,指示早元古代的地壳源区。采于深度1621.1m样品的Nd同位素模式年龄高达3.17 Ga,类似于高山等(2001)所报道的扬子克拉通内崧岭群高级变质岩中碎屑锆石的年龄(3.3 Ga)及其中Nd同位素模式年龄(3.2~3.3 Ga, Gao *et al.*, 1999)。有一个花岗片麻岩(采于1826.2 m深)没有能够算出合理的模式年龄,主要是由于其异常的 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 值(-0.04)造成的,可能指示其在地壳环境中又经历过一次Sm/Nd分馏事件。

斜长片麻岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 现在值及计算所获得的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初时值的变化范围均相对较小(图3)。但 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值的变化范围很广,从+1.3到-9.4。其中采自大套斜长片麻岩段的样品其 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值从-3.0到-9.4,但总体类似或略高于主孔及大别山-苏鲁造山带花岗片麻岩露头的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(如 Ames *et al.*, 1996; Xue *et al.*, 2001; 郑祥身等, 2000)。

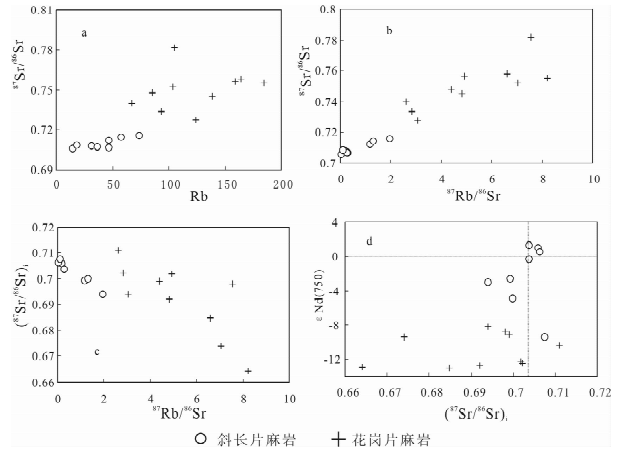


图3 主孔0~2000 m 片麻岩的Rb-Sr 和 Sm-Nd 资料图解(a) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. Rb, (b) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$, (c) $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ vs. $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$, (d) $\epsilon_{\text{Nd}}(750)$ vs. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$

Fig. 3 Rb-Sr and Sm-Nd whole rock data plots for orthogneisses and “paragneisses” from the interval between 0 and 2000 m in the CCSD-MH: (a) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. Rb, (b) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$, (c) $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ vs. $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$, (d) $\epsilon_{\text{Nd}}(750)$ vs. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$

该岩性段斜长片麻岩的Nd同位素模式年龄介于2.1~2.4 Ga,与花岗片麻岩的 T_{DM} 值类似。

而采于变镁铁质岩“夹层”中的斜长片麻岩显示出接近球粒陨石的Nd同位素特征($\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +1.3 \sim -2.6$),类似或略低于邻近的榴辉岩和斜长角闪岩围岩的Nd同位素组成及大别山-苏鲁造山带内大多数榴辉岩的Nd同位素组成(如 Li *et al.*, 1993; Ames *et al.*, 1996; Chavagnac and Jahn, 1996; Jahn, 1998)。它们的Nd同位素模式年龄($T_{\text{DM}} = 1.28 - 1.60$ Ga)虽然早于其原岩的侵位年龄,但明显小于花岗片麻岩及大套斜长片麻岩的 T_{DM} 值。

5 讨论与结论

5.1 超高压变质及退变质过程中的Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素体系

图3显示,片麻岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值与Rb含量关系密切(Fig. 3a),且与 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 呈明显的正相关(Fig. 3b),但 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初时值(以 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 表示)则呈现出负相关性(Fig. 3c),意味着 ^{87}Sr 中的很大一部分是原岩侵位后由 ^{87}Rb 衰变成的。对花岗片麻岩而言,虽然 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 测量值很高(0.7278~0.7718),但大多数样品计算所获得的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初时值却很低,甚至低于地幔源区的岩石(Fig. 3d),这显然是不可能的。造成花岗片麻岩的 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 值低且分散的原因可归于花岗质侵入体侵位后又发生过Rb的加入事件,该事

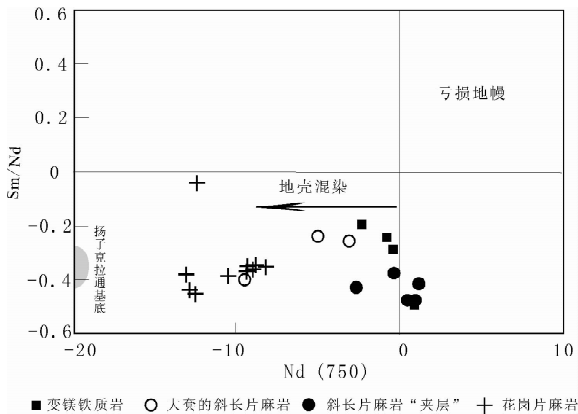


图 4 主孔 0~2000 m 片麻岩与变镁铁质岩的 $\epsilon_{Nd}(750) \sim f_{Sm/Nd}$ 关系图解

Fig. 4 Sm-Nd isotopic compositions of gneisses and meta-mafic rocks from the CCS-D-MH

件可能发生在超高压岩石退变质作用过程中。如果是这样,那么说明 Rb-Sr 同位素体系在超高压变质及随后的退变质作用过程中是开放的。Ames *et al.* (1996) 的研究也表明,超高压变质岩的 Rb-Sr 同位素体系已受到了明显的扰动。因此,依据它们的 Sr 同位素组成难以示踪其原岩的特征。

另一方面,许多学者的研究表明,Sm-Nd 同位素体系在整个大陆岩石深俯冲及随后的折返过程中没有受到过明显的干扰(如 Ames *et al.*, 1996; Jahn *et al.*, 1996; Jahn, 1999),因而岩石中的 Nd 同位素组成能够很好地示踪原岩的性质。表 1 和图 4 均显示,主孔中斜长片麻岩和花岗片麻岩具有明显不同的 Nd 同位素组成,指示不同的原岩属性。

5.2 原岩性质

主孔中花岗片麻岩都具低且较均一的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值,它们的 Nd 同位素模式年龄 (T_{DM}) 除个别样品外,集中在 2.3 Ga 左右。该特征,结合它们强烈的 Nb 负异常,指示它们的原岩可能是由古元古代的地壳岩石在新元古代发生部分熔融形成的,源区的成分比较均一。

一般认为斜长片麻岩是由表壳岩变质而来的,并习惯称之为副片麻岩,但相对高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值表明它们不可能是由典型的沉积岩变质而来。另外,这些斜长片麻岩的化学成分在 Harker 图解上表现出与岩浆岩相似的连续演化特征(参见薛怀民和刘福来,2005),也意味着这些斜长片麻岩的原岩可能主要是火成岩。但主孔中这些斜长片麻岩的 Nd 同位素初时值比较分散,结合它们的微量元素地球化学的特征,指示其原岩可能具有不同的初始同位素组成,意味着多成因或来源于不均匀的地壳源区。

变质镁铁质主岩中薄的斜长片麻岩“夹层”所拥有的 Nd 同位素组成及主量和微量元素特征,与其是由沉积岩变质而

来(副片麻岩)的假说明显不符。相反可以很自然地用有关榴辉岩退变质来解释或指示它们的原岩之间有成因联系。这些斜长片麻岩的 Nd 同位素模式年龄略早于其原岩的侵位年龄,指示镁铁质岩浆分异过程中有些地壳物质的同化或它们是由不成熟的地壳物质部分熔融形成的。我们倾向于认为它们是由玄武质岩浆演化而来的,在分异过程中伴有一定程度的地壳混染。若该片麻岩是由两个 Nd 源混合形成的,那么两个端元必然位样品成分变化范围的两侧,由图 4 中 Sm-Nd 资料显示任何可能的地壳源区混染玄武质岩浆必须具有 $\epsilon_{Nd}(t)$ 小于 -2.6,这就要求可能的大陆地壳组份富集 Nd/Sm 的历史远早于 750 Ma。区内有两个长寿命的大陆地壳其同位素组成可解释 Nd 的混染,一是本钻孔中花岗片麻岩的源区——可能是早元古代的地壳岩石,另一是扬子克拉通崆岭高级变质地块内的太古代 TTG 片麻岩(e.g., Ames *et al.*, 1996)。

大套斜长片麻岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值变化范围广(-3.0 ~ -9.4),指示多成因或不均匀的地壳源区。虽然其中具高 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值的部分(仅比球粒陨石的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 略低)可能与那些变镁铁质寄主岩石中的“夹层状”斜长片麻岩类似,也是起源于玄武岩浆,只是其中混染了更多些的地壳物质,但更可能是由镁铁质地壳物质直接部分熔融形成的。它们的 Nd 同位素模式年龄 (T_{DM}) 介于 2.1 ~ 2.4 Ga 之间,远高于它们原岩的实际侵位年龄(~0.8 Ga)而类似于花岗片麻岩的 T_{DM} 值。该特征,结合它们的主元素和微量元素特征,意味着它们是上地幔来源的玄武岩浆引起古老但不均匀地壳源区部分熔融的结果或母岩浆在分异过程中受到很古老的地壳(如崆岭群,大约 3.3 Ga)不同程度的混染。该岩性段的原岩可能是以酸性占优势的不对称性双峰式火山岩,类似于现残留的扬子克拉通北缘的新元古代双峰式火山岩(如随州群)。

References

- Ames L, Zhou G, Xiong B. 1996. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze Cratons, central China. *Tectonics*, 15: 472-489
- Boynnton WV. 1984. Geochemistry of the rare earth elements; metrorite studies. In: Henderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, 63-114
- Chavagnac V, Jahn BM. 1996. Coesite-bearing eclogites from the Bixiling Complex, Dabie Mountains, China: Sm-Nd ages, geochemical characteristics and tectonic implications. *Chemical Geology*, 133: 29-51
- Cohen AS, O'Nions RK, Siegenthaler R, Griffin WL. 1988. Chronology of the pressure-temperature history recorded by a granulite terrain. *Contribution to Mineral and Petrology*, 98: 303-311
- Gao S, Ling WL, Qiu YM, Lian Z, Hartmann G, Simon K. 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: 2071-2088

- Gao S, Yumin Qiu, Ling WL, Neal J McNaughton, David I Groves. 2001. U-Pb SHRIMP geochronologic study of Zircon from the Kongling high-grade terrain—discover of continental crust material with ages >3.2 Ga. *Science in China*, 31: 27–35 (in Chinese)
- Hacker BR, Wang X, Eide EA, Ratschbacher L. 1996. The Qinling-Dabie ultrahigh-pressure collisional oroge. In Yin A, Harrison TM. Eds., *Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, United Kingdom, p. 345–370
- Hacker BR, Ratschbacher L, Webb L, Ireland T. 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie orogen, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 161: 215–230
- Hacker BR, Ratschbacher L, Webb L, McWilliams M, Ireland T, Calvert A, Dong S, Wenk HR, Chateigner D. 2000. Exhumation of ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Late Triassic-Early Jurassic tectonic unroofing. *Journal of Geophysical Research*, 105(B6): 13339–13364
- Jahn BM, Cornicher J, Cong B, Yui TF. 1996. Ultrahigh ϵ_{Nd} eclogites from an UHP metamorphic terrane of China. *Chemical Geology*, 127: 61–79
- Jahn BM. 1998. Geochemical and isotopic characteristics of UHP eclogites of the Dabie orogen: Implications for continental subduction and collisional tectonics. In: Hacker B and Liou JG (eds.). *When Continents Collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-pressure Rocks*. Dordrecht, Kluwer Acad. Publication, 203–239
- Jahn BM. 1999. Sm-Nd isotope tracer study of UHP metamorphic rocks: Implications for continental subduction and collisional tectonics. *Internal Geology Review*, 41: 859–885
- Li S, Xiao Y, Liou D, Chen Y, Ge N, Zhang Z, Sun SS, Cong B, Zhang R, Hart S and Wang S. 1993. Collision of the North China and Yangtze blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes. *Chemical Geology*, 109: 89–111
- Liou JG, Zhang RY, Eide EA, Maruyama S, Wang X, Ernst WG. 1996. Metamorphism and tectonics of high-P and ultrahigh-P belt in Dabie-Sulu Regions, eastern central China. In: Yin A, Harrison TM (eds.). *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge University, New York, 300–343
- Liu FL, Xu ZQ, Yang JS, Xue HM, Li TF. 2004a. Geochemical characteristics and UHP metamorphism of granitic gneisses in the main drilling hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project and its adjacent area. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 9–26 (in Chinese with English abstract)
- Liu FL, Xu ZQ, Xue HM. 2004b. Tracing the protolith, UHP metamorphism, and exhumation ages of orthogneiss from the SW Sulu terrane (eastern China): SHRIMP U-Pb dating of mineral inclusion-bearing zircons. *Lithos*, 78: 411–429
- McDonough WF, Sun SS. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120: 223–253
- Okay AI, Sengor AMC, Satir M. 1993. Tectonics of an ultrahigh-pressure metamorphic terrane: The Dabie Shan/Tongbai Shan orogen, China. *Tectonics*, 12: 1329–1334
- Rowley DB, Xue F, Tucker RD, Peng ZX, Bake J, Davis A. 1997. Ages of ultrahigh pressure metamorphism and protolith orthogneisses from the eastern Dabie Shan: U/Pb zircon Geochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 151: 191–203
- Taylor SR, McLennan SM. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution – An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks*. Blackwell Scientific, Oxford, 312pp
- Xu ZQ. 2004. The scientific goals and investigation progresses of the Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 1–8 (in Chinese with English abstract)
- Xue F, Rowley DB, Tucker RD, Peng ZX. 1997. U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the North Dabie complex, eastern Dabie Shan, China. *Journal of Geology*, 105: 744–753
- Xue HM, Dong SW, Liou XC. 2001. Geochemical Characteristics and Their Genesis of the Granitic Gneisses from Southeastern Dabie Mountain. *Acta Geologica Sinica*, 14: 175–183
- Xue HM, Dong SW, Liu XC. 2002. U/Pb Zircon Dating of Granitic Gneisses in Eastern Dabie Mountain, Central China. *Chinese Journal of Geology*, 37: 165–173 (in Chinese with English abstract)
- Xue HM, Liu FL. 2005. Geochemical characteristics and genesis of plagiogneiss from the 0 ~ 2000 m main hole of the Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 355–368 (in Chinese with English abstract)
- Xue HM, Liu FL, Meng FC. 2006. Major and trace element geochemistry of granitic gneisses from Sulu orogen, eastern Shangdong peninsula: evidence for a Neoproterozoic active continental margin in the northern margin of the Yangtze craton. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7): 1779–1790 (in Chinese with English abstract)
- Ye K, Cong BL, Ye DL. 2000. The possible subduction of continental material to depths greater than 200 km. *Nature*, 407: 734–736
- Zhai MG, Cong BL, Zhang Q, and Wang QC. 1994. The northern Dabieshan terrain: A possible Andean-type arc. *Internal Geology Review*, 36: 867–883
- Zheng XS, Jin CW, Zhai MG, and Shi YH. 1999. Petrochemistry and tectonic background of the grey gneisses in north Dabie terrane. *Acta Petrologica Sinica*, 15: 350–358 (in Chinese with English abstract)
- Zheng XS, Jin CW, Zhai MG, and Shi YH. 2000. Approach to the source of the gray gneisses in North Dabie Terrain: Sm-Nd isochron age and isotope composition. *Acta Petrologica Sinica*, 16: 194–198 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 高山, Yumin Qiu, 凌文黎, Neal J. McNaughton, David I. Groves. 2001. 崆岭高级变质地体单颗粒锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究——扬子克拉通 >3.2 Ga 陆壳物质的发现. *中国科学*, 31: 27–35
- 刘福来, 许志琴, 杨经绥等. 2004a. 中国大陆科学钻探工程主孔及周边地区花岗岩片麻岩的地球化学性质和超高压变质作用标志的识别. *岩石学报*, 20(1): 9–26
- 许志琴. 2004. 中国大陆科学钻探工程的科学目标及初步成果. *岩石学报*, 20: 1–8
- 薛怀民, 董树文, 刘晓春. 2002. 大别山东部花岗岩片麻岩的锆石 U-Pb 年龄. *地质科学*, 37: 165–174
- 薛怀民, 刘福来. 2005. 中国大陆科学钻探工程主孔 0 ~ 2000 米斜长片麻岩的地球化学性质及成因研究. *岩石学报*, 21: 355–368
- 薛怀民, 刘福来, 孟繁聪. 2006. 苏鲁造山带胶东区段花岗岩片麻岩类的常量与微量元素地球化学: 扬子克拉通北缘新元古代活动大陆边缘的证据. *岩石学报*, 22: 1779–1790
- 郑祥身, 金成伟, 翟明国, 石永红. 1999. 北大别灰色片麻岩的岩石化学特征及大地构造背景. *岩石学报*, 15: 350–358
- 郑祥身, 金成伟, 翟明国, 石永红. 2000. 北大别灰色片麻岩原岩性质的探讨: Sm-Nd 同位素年龄及同位素成分特点. *岩石学报*, 16: 194–198