

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

中国大陆科学钻探工程主孔3000~3500 m 花岗质片麻岩地球化学性质及其成因机制

周开富, 刘福来, 许志琴, 李天福, 杨经绥, 薛怀民, 叶建国

中国地质科学院地质研究所大陆动力学实验室, 北京, 100037

内容提要: 中国大陆科学钻探工程主孔(CCS-D-MH)3000~3500 m 深度范围内的岩心揭示的主要岩石类型以正、副片麻岩为主, 夹少量的榴辉岩、片岩及斜长角闪岩等。正片麻岩可进一步划分为钾长花岗质片麻岩和二长花岗质片麻岩。地球化学研究表明, 花岗质片麻岩的 SiO_2 含量普遍高, 为 73.56%~79.01%, Al_2O_3 含量为 10.49%~13.75%; TiO_2 、 Fe_2O_3 、 FeO 、 MnO 和 MgO 的含量明显偏低, 其中 Fe_2O_3 为 0.26%~2.56%, FeO 为 0.09%~1.13%, MgO 为 0.01%~0.63%; 岩石明显富含 Na_2O 、 K_2O , 强烈贫钙, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 的含量为 6.20%~9.15%, K_2O 的含量为 1.26%~5.67%, CaO 的含量为 0.08%~1.59%。花岗质片麻岩在洋脊玄武岩标准化蛛网图上都表现出强烈富集大离子亲石元素(K、Rb、Th)的特点, 高场强元素 Ti、Ta 和 Nb 表现为明显的负异常, 而 Hf 和 Zr 则为明显正异常。3000~3500 m 花岗质片麻岩的原岩具 A 型花岗岩的特征, 形成于大陆裂谷环境, 记录了 Rodinia 超大陆裂解时苏鲁地区的花岗岩浆事件, 表明新元古代晚期扬子板块北缘的构造属性为大陆裂谷环境。

关键词: 花岗质片麻岩; 地球化学性质; 成因机制; 中国大陆科学钻探工程

大别—苏鲁超高压变质带是世界上规模最大的超高压变质带, 而苏鲁超高压变质地体则位于该超高压变质带的东端。前人研究表明, 花岗质片麻岩是苏鲁超高压变质带的主要岩石类型之一, 占超高压变质岩石的 80% 以上。少数研究者认为花岗质片麻岩是由黑云斜长片麻岩等在退变质过程中发生部分熔融、深熔, 经钾交代形成(钟增球等, 1999; 凌文黎等, 2000; 游振东等, 2004)。多数研究者通过岩相学、地球化学和同位素年代学的详细研究(Ames et al., 1996; 王来明等, 2001; 唐俊等, 2004; 刘福来等, 2004, 2005a, 2005b) 后认为, 花岗质片麻岩是由形成于新元古代的花岗岩, 经超高压(高压)变质形成(江世俊和李美美, 1995; 李永刚等, 1999; 郑祥身等, 1999; Liu et al., 2001; Xue et al., 2001; 孙海婷等, 2002; 刘福来等, 2004, 2005a), 但对其中的花岗片麻岩原岩形成时大别—苏鲁超高压变质带在新元古代晚期的构造属性认识却不一致。从前人的研究成果看, 主要存在以下不同的观点。钱存超等(1999)、樊金涛(2000)认为新元古代晚期发生了中朝板块与扬子板块的碰撞, 属于陆陆碰撞的构造环境, 认为其中

的 A 型花岗岩是碰撞后加厚的地壳发生部分熔融形成。然而越来越多的研究成果表明, 中朝板块与扬子板块的碰撞发生在三叠纪, 在新元古代晚期并没有碰撞, 因此这种观点现今已很少有人提及。刘福来等(2004, 2005b)在研究了中国大陆科学钻探工程主孔 0~3000 m 的正片麻岩后认为其原岩形成于板内裂谷和陆缘火山弧两种构造环境。李永刚等(1999)也认为新元古代晚期苏鲁地体可能存在板内和陆缘火山弧两种构造环境。薛怀民等(2006)认为苏鲁超高压变质地体中大面积出现的高钾 I 型花岗质片麻岩和 A 型花岗质片麻岩的原岩形成与大洋板块的俯冲有关, 认为苏鲁地体在新元古代晚期属于活动大陆边缘火山弧构造环境。

最新研究成果表明, 格林威尔造山运动及与其时代相近的造山运动将全球分散的大陆汇聚成以劳伦大陆为中心的 Rodinia 超大陆(Mcmenamin et al., 1990; Hoffman, 1991; Dalziel, 1991), 新元古代晚期(600~750 Ma, Acharyya, 2000)是 Rodinia 超大陆裂解的主要时期(郑永飞, 2003; 陆松年等, 2004; Hoffman, 1991; Condie, 2001), 全球都处在以

注: 本文为国家重点基础研究发展规划“973”项目(编号 2003CB716502)、国家自然科学基金重大项目(编号 40399143)和国土资源大调查地质调查项目(编号 121201056606)联合资助成果。

收稿日期: 2006-10-27; 改回日期: 2006-11-10; 责任编辑: 周健。

作者简介: 周开富, 男, 在读硕士, 主要从事变质岩石学研究。通讯地址: 100037, 北京百万庄路 26 号, 中国地质科学院地质研究所; Email: liufulai@ccsd.cn.

张性应力场为主的构造环境下,扬子板块北缘也不例外。因此对位于扬子板块北缘苏鲁超高压变质带中大量新元古代形成的花岗岩进行研究,重塑新元古代扬子板块北缘的构造属性,对探讨苏鲁高压—超高压变质地体的形成与演化的动力学过程具有十分重要的意义。本文以中国大陆科学钻探工程主孔3000~3500 m的花岗质片麻岩为研究对象,①重点开展花岗质片麻岩的地球化学性质研究;②探讨其原岩形成的构造环境;③结合前人的研究成果,综合分析新元古代晚期苏鲁地体所处的大地构造背景。

1 中国大陆科学钻探工程主孔3000~3500 m 花岗质片麻岩分布

中国大陆科学钻探工程主孔(CCSSD-MH)位于江苏省东海县境内的毛北地区(许志琴,2004)。从主孔岩性剖面(图1)可以看出,在3000~3500 m范围内,揭示的主要岩石类型以正、副片麻岩为主,夹少量的榴辉岩、片岩及斜长角闪岩。该特征与CCSD-MH主孔2000~3000 m的岩性组合特征相同,而与0~2000 m岩性组合存在明显差别(刘福来等,2004)。根据中国大陆科学钻探工程现场岩石及构造

实验室的岩心编录结果,CCSD-MH主孔3000~3500 m深度范围内的花岗质片麻岩总厚度为234.89 m(表1)。单元厚度最大82.21 m,最小1.82 m。主要分布于3086.45~3168.66 m、3244.33~3297.36 m、3305.64~3397.11 m和3470.07~3481.38 m之间,在其他深度范围内主要以“夹层”形式赋存于副片麻岩及片岩之中,夹层厚度最小只有几个厘米。与围岩多呈突变接触。其中,钾长花岗质片麻岩主要分布于3264.50~3284.12 m、3285.47~3297.36 m、3302.83~3304.65 m、3305.64~3320.82 m、3338.86~3350.89 m、3359.68~3374.22 m、3381.60~3397.11 m、3474.08~3481.38 m,总厚度97.89 m,占花岗质片麻岩的41.67%,单元最大厚度19.62 m,最小厚度1.82 m。二长花岗质片麻岩主要分布于3057.58~3060.00 m、3086.45~3168.66 m、3244.33~3264.50 m、3320.82~3331.74 m、3334.80~3338.86 m、3350.89~3358.90 m、3376.40~3381.60 m、3470.07~3474.08 m的井段(图1),厚度达137 m,占花岗质片麻岩的58.33%,单个单元厚度最大82.21 m,最小2.42 m。

表1 中国大陆科学钻探工程主孔3000~3500 m 花岗质片麻岩分布

Table 1 Distributing of granitic gneiss in the depth interval 3000~3500 m of CCSD-MH

井段(m)	厚度(m)	岩性	夹层岩性
3057.58~3060.00	2.42	二云二长花岗质片麻岩	绿帘角闪黑云片岩、绿帘黑云片岩
3086.45~3168.66	82.21	含磁铁矿二云二长花岗质片麻岩、白云母二长花岗质片麻岩、二云二长花岗质片麻岩、含磁铁矿二长花岗质片麻岩	白云母斜长片麻岩、绿帘角闪黑云片岩、绿帘黑云斜长角闪岩、绿帘黑云斜长片麻岩、绿帘黑云角闪斜长片麻岩
3244.33~3284.12	39.79	含磁铁矿二长花岗质片麻岩、含磁铁矿钾长花岗质片麻岩、含磁铁矿多硅白云母钾长花岗质片麻岩、含石榴钾长花岗质片麻岩、钾长花岗质片麻岩	
3285.47~3297.36	11.89	含磁铁矿钾长花岗质片麻岩、含石榴钾长花岗质片麻岩、多硅白云母二长花岗质片麻岩	
3302.83~3304.65	1.82	多硅白云母钾长花岗质片麻岩	方解石化绢云母化黑云二长片麻岩
3305.64~3331.74	26.10	二云钾长花岗质片麻岩、黑云母二长花岗质片麻岩、黑云钾长花岗质片麻岩、条纹状黑云二长花岗质片麻岩、方解石化绢云母化黑云二长花岗质片麻岩、含石榴钾长花岗质片麻岩、含磁铁矿钾长花岗质片麻岩、绿帘黑云二长花岗质片麻岩、含石榴黑云二长花岗质片麻岩、多硅白云母二长花岗质片麻岩	绿帘黑云斜长片麻岩、绿帘黑云片岩、绿帘角闪黑云片岩
3334.80~3358.90	24.10	二云二长花岗质片麻岩、黑云二长花岗质片麻岩、含磁铁矿钾长花岗质片麻岩、黑云钾长花岗质片麻岩、含石榴黑云二长花岗质片麻岩	绿帘角闪黑云片岩、角闪绿帘黑云片岩
3359.68~3374.22	14.54	含角闪石钾长花岗质片麻岩、黑云钾长花岗质片麻岩	
3376.40~3397.11	20.71	黑云钾长花岗质片麻岩、黑云二长花岗质片麻岩、含角闪石钾长花岗质片麻岩、钾长花岗质片麻岩、含磁铁矿二长花岗质片麻岩、含磁铁矿钾长花岗质片麻岩	绿帘角闪片岩、黑云角闪片岩
3470.07~3481.38	11.31	多硅白云母钾长花岗质片麻岩、含黑云母二长花岗质片麻岩、含磁铁矿二长碎斑岩、含磁铁矿钾长花岗质片麻岩	

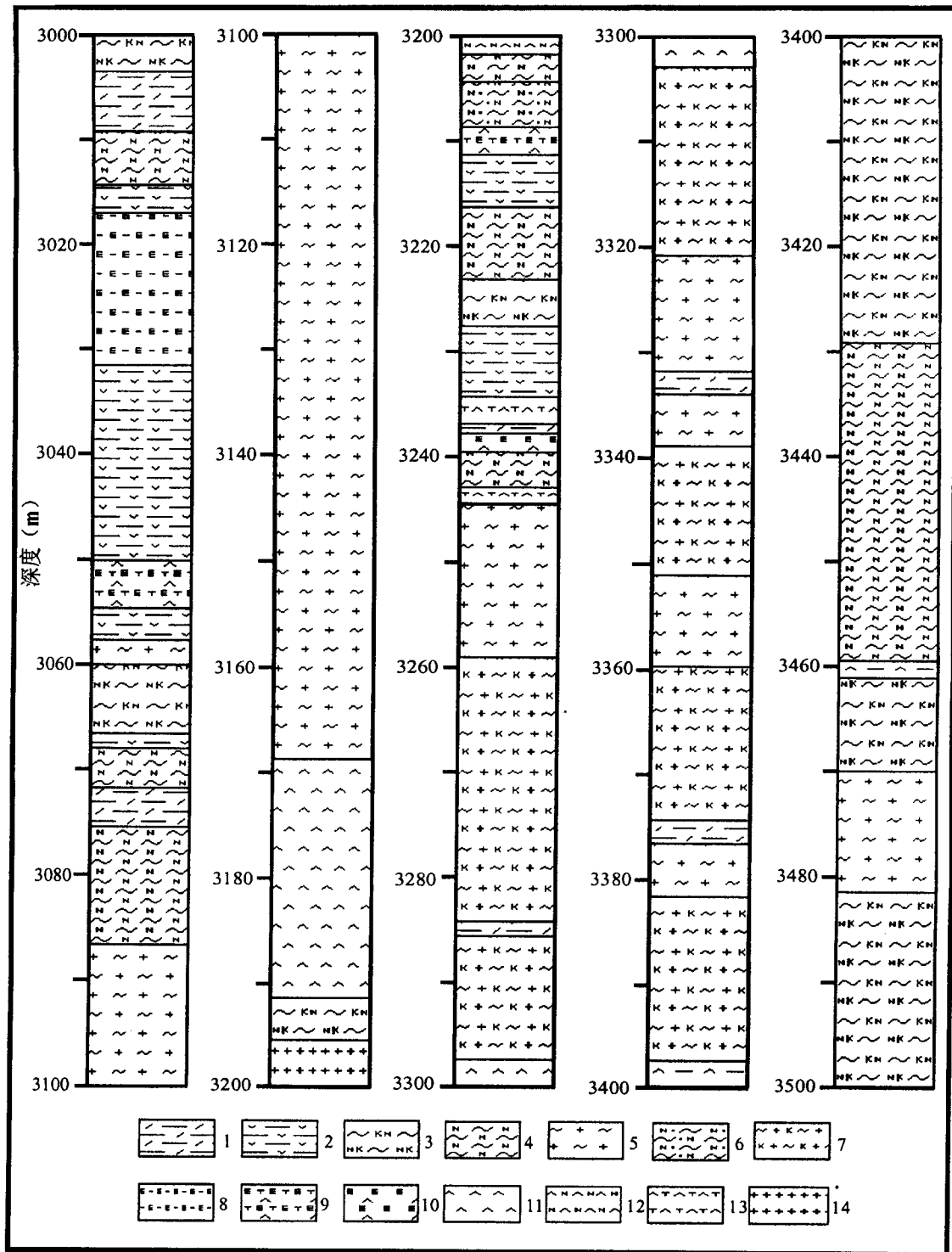


图 1 中国大陆科学钻探工程主孔3000~3500 m 岩性剖面

Fig. 1 Lithological section in the depth intervals 3000~3500 m of the main drill hole CCSD-MH, Chinese Continental Scientific Drilling Project

1—黑云片岩;2—角闪片岩;3—绿帘黑云(二云)二长片麻岩;4—绿帘角闪黑云斜长片麻岩;5—二长花岗质片麻岩;6—含石榴子石的绿帘黑云斜长片麻岩;7—钾长花岗质片麻岩;8—多硅白云母榴辉岩;9—角闪石化金红石榴辉岩;10—角闪石化石英榴辉岩;11—黑云角闪片岩;12—斜长角闪岩;13—含金红石黑云角闪片岩;14—钾长岩脉

1—Biotite schist; 2—amphibole schist; 3—epidote-biotite (phengite) monzonitic gneiss; 4—epidote-amphibole-biotite plagioclase gneiss; 5—monzonitic granitic gneiss; 6—garnet-bearing epidote-biotite plagioclase gneiss; 7—K-feldspar granitic gneiss; 8—phengite-bearing eclogite; 9—amphibolitized rutile-bearing eclogite; 10—amphibolitized quartz-bearing eclogite; 11—biotite-bearing amphibole schist; 12—amphibolite; 13—rutile-bearing biotite amphibole schist; 14—vein

2 中国大陆科学钻探工程主孔3000~3500 m 花岗质片麻岩的岩相学特征

根据岩相学研究结果,3000~3500 m 花岗质片麻岩的浅色矿物钾长石+斜长石+石英含量大于90%,暗色矿物含量小于10%。暗色矿物在岩心中分布均匀,主要为金红石、石榴子石、榍石、绿帘石、褐帘石及金属矿物磁铁矿、黄铁矿等。片状矿物黑云母和白云母及柱状矿物角闪石等略具定向排列。粒状花岗变晶结构,弱片麻状构造或块状构造。根据刘福来等(2005a,2005b)对花岗质片麻岩的岩相学研究表明,中国大陆科学钻探工程主孔3000~3500 m 正片麻岩均经历了后期角闪岩相退变质作用的改造,在薄片尺度范围内未发现任何可信的超高压变质矿物证据,但在变质锆石增生微区中普遍发现了超高压变质矿物柯石英,表明了该类正片麻岩曾经历了超高压变质作用(刘福来等,2005a)。

2.1 钾长花岗质片麻岩

钾长花岗质片麻岩主要呈浅肉红色,粒状花岗变晶结构,弱片麻状或块状构造。其主要浅色矿物组成为钾长石+石英,可含少量的斜长石,其他有多硅白云母、磷灰石、金红石、磁铁矿、石榴子石、榍石、黑云母、角闪石、帘石等矿物,含量为1%~5%。钾长石呈粒状他形一半自形,粒径0.4~3 mm,局部可达4 mm,含量为52%~64%,钾长石颗粒中常见小的石英颗粒;石英粒状他形一半自形,粒径一般0.1~1.0 mm,含量35%~45%。

根据钾长花岗质片麻岩中所含的特征变质矿物和主要的片、柱状矿物种类及含量进一步划分为含石榴子石钾长花岗质片麻岩、含黑云母钾长花岗质片麻岩、多硅白云母钾长花岗质片麻岩、含磁铁矿钾长花岗质片麻岩、含角闪石钾长花岗质片麻岩、二云钾长花岗质片麻岩及钾长花岗质片麻岩(基本不含暗色矿物)。

2.2 二长花岗质片麻岩

二长花岗质片麻岩为灰白色—浅肉红色,鳞片粒状花岗变晶结构,弱片麻状—块状构造,主要矿物为钾长石+斜长石+石英,而黑云母、多硅白云母、石榴子石、绿帘石、榍石、磷灰石、磁铁矿等含量极少,为1%~10%左右。钾长石呈他形一半自形粒状,细粒状的钾长石粒径小于0.1 mm,粒度较粗的钾长石粒径为1~4 mm,含量变化于10%~45%之间;斜长石呈半自形—他形粒状,粒径0.5~2.0 mm,含量

变化于10%~53%;石英粒状他形一半自形,粒径0.5~3.0 mm,含量20%~35%左右。

根据岩石中所含片柱状及特征变质矿物可分出如下几种二长花岗质片麻岩:二云二长花岗质片麻岩、含磁铁矿二长花岗质片麻岩、含磁铁矿二云二长花岗质片麻岩、黑云二长花岗质片麻岩、含石榴黑云二长花岗质片麻岩、多硅白云母二长花岗质片麻岩、含石榴黑云二长花岗质片麻岩。

3 中国大陆科学钻探工程主孔3000~3500 m 花岗质片麻岩的地球化学性质

3.1 分析方法

对主孔3000~3500 m 花岗质片麻岩共计测试76件样品,其中钾长花岗质片麻岩39件,二长花岗质片麻岩37件。全岩化学成分在北京国家地质测试分析中心分析。其中主元素是用X荧光光谱法(XRF)完成,所用仪器为日本理学3080,误差约0.5%;微量元素Zr、Sr、Ba、Zn、Rb、Cl、Y和Nb用X荧光光谱法(XRF Rigaku-2100),误差分别为Ba=5%,Cl=2%~14%,其他元素约3%;稀土元素及V、Cr、Ni、Co、Cu、Pb、U、Th、Ta和Hf用TJA-PQ-ExCell等离子体光谱仪分析,当元素含量>1 μ g/g时误差为1%~5%,当元素含量<1 μ g/g时误差为5%~10%。其具有代表性24件样品的主元素、稀土元素和微量元素的测试结果列入表2中。

3.2 主元素成分特征

3.2.1 钾长花岗质片麻岩

钾长花岗质片麻岩的主元素化学成分主要表现为SiO₂含量普遍高,为73.56%~78.32%,平均值为76.88%,Al₂O₃含量为11.17%~13.25%,平均值为11.84%。FeO、Fe₂O₃、MgO、MnO的含量明显偏低,其中FeO=0.09%~1.06%,Fe₂O₃=0.32%~2.56%,MgO=0.01%~0.32%,大部分小于0.1%,MnO=0.01%~0.09%,岩石强烈贫钙,富含钾、钠,CaO=0.08%~0.71%,K₂O和Na₂O的含量分别为3.88%~5.15%和3.45%~4.93%。SiO₂与TiO₂、Al₂O₃、CaO、Na₂O具有比较明显的负相关性,而与其他主元素的相关性不明显。

3.2.2 二长花岗质片麻岩

二长花岗质片麻岩的主元素化学成分与钾长花岗质片麻岩具相似的特征。SiO₂含量同样偏高,为74.72%~79.97%,平均值为76.61%,Al₂O₃含量为10.49%~13.75%,平均值为11.88%,FeO、Fe₂O₃、

表 2 中国大陆科学钻探工程主孔3000~3500 m 代表性花岗质片麻岩的化学成分

Table 2 Whole rock chemical components of granitic gneiss in the depth interval 3000~3500 m in CCSD-MH

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
样品号	R11P13c	R14P14e	R18P30e	R21P4a	R21P41	R31P44a	R34P14c	R34P26b	R35P6i	R37P29a	R37P34h	R38P35e
深度(m)	3057.82	3087.7	3125.16	3149.03	3154.75	3244.72	3266.09	3271.22	3280.18	3292.4	3295.47	3303.28
SiO ₂	76.88	77.31	75.60	75.45	75.69	79.01	78.32	75.75	75.48	75.57	78.05	76.96
TiO ₂	0.12	0.13	0.14	0.14	0.14	0.12	0.11	0.16	0.16	0.19	0.12	0.13
Al ₂ O ₃	11.83	11.15	12.39	12.30	12.02	10.55	11.20	12.48	12.46	12.54	11.54	11.48
Fe ₂ O ₃	0.90	1.21	1.19	1.40	1.37	0.68	1.93	1.42	1.64	1.19	0.66	0.54
FeO	0.66	0.66	0.79	0.50	0.54	0.25	0.47	0.57	0.52	0.48	0.43	0.54
MgO	0.15	0.12	0.17	0.16	0.16	0.08	0.01	0.09	0.10	0.07	0.05	0.31
MnO	0.04	0.03	0.06	0.05	0.03	0.02	0.05	0.04	0.07	0.04	0.02	0.02
CaO	0.66	0.33	0.71	0.68	0.81	0.34	0.08	0.53	0.71	0.36	0.23	0.61
Na ₂ O	3.61	3.24	4.34	4.06	3.83	3.20	3.87	4.19	4.54	4.20	3.49	3.90
K ₂ O	4.70	4.76	3.92	4.29	4.10	4.87	4.34	4.32	3.97	4.68	5.15	4.72
P ₂ O ₅	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	<0.01	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.03
CO ₂	0.35	0.21	0.18	0.30	0.35	0.09	0.35	0.14	0.23	0.14	0.18	0.39
H ₂ O ⁺	0.26	0.26	0.20	0.14	0.40	0.24	0.12	0.26	0.14	0.14	0.18	0.22
Los	0.39	0.32	0.44	0.23	0.70	0.23	0.65	0.33	0.24	0.35	0.29	0.69
La	67.6	55.3	36.5	39.1	36.1	3.38	48.4	40.4	37.5	53.8	25.1	24.8
Ce	129	108	71.3	77.7	72.5	11.8	97.2	81.3	76.2	110	51.3	53.9
Pr	14.6	12.2	8.61	9.34	8.57	2.09	10.8	9.18	8.74	12.3	5.85	6.41
Nd	50.9	45.7	32.8	34.9	31.8	10.5	41.2	34.8	33.8	44.8	21.9	24.5
Sm	9.34	8.6	6.85	7.46	6.80	3.25	7.85	7.08	7.01	8.22	4.61	5.20
Eu	0.46	0.89	1.27	1.27	1.45	0.25	0.79	1.20	1.41	1.08	0.90	0.76
Gd	8.03	7.38	6.89	7.00	6.09	2.94	6.88	6.64	6.66	6.87	4.18	4.92
Tb	1.28	1.10	1.11	1.16	1.02	0.54	1.14	1.14	1.16	1.09	0.72	0.91
Dy	8.13	6.66	6.95	7.16	6.51	3.39	6.75	7.28	7.31	6.42	4.50	5.86
Ho	1.66	1.31	1.41	1.42	1.56	0.70	1.38	1.51	1.53	1.32	0.90	1.24
Er	5.07	3.86	4.20	4.44	4.15	2.14	4.06	4.71	4.73	4.22	2.68	3.93
Tm	0.77	0.55	0.61	0.62	0.62	0.32	0.56	0.70	0.70	0.62	0.39	0.58
Yb	4.98	3.87	4.12	4.16	4.03	2.19	3.64	4.90	4.73	4.31	2.68	3.84
Lu	0.79	0.60	0.65	0.62	0.78	0.34	0.55	0.74	0.73	0.67	0.42	0.56
ΣLREE	271.90	230.69	157.33	169.77	157.22	31.29	206.21	173.96	164.63	230.06	109.65	115.56
ΣHREE	30.71	25.33	25.94	26.58	24.76	12.56	24.95	27.62	27.55	25.52	16.46	21.84
L/H	8.85	9.11	6.07	6.39	6.35	2.49	8.27	6.30	5.98	9.02	6.66	5.29
Eu/Eu*	0.16	0.33	0.56	0.53	0.68	0.24	0.32	0.53	0.62	0.43	0.62	0.45
Sr	40.2	41.0	57.2	57.7	53.1	28.4	12.5	53.9	56.6	38.6	40.5	33.9
Rb	77.4	98.9	107	123	108	82.3	89.5	111	111	94.3	107	108
Ba	451	496	1278	1237	1207	53.7	476	1127	1257	427	652	425
Th	8.81	9.73	8.33	9.82	9.71	0.62	9.19	12.9	10.4	9.68	4.51	7.41
Ta	0.67	0.80	0.69	0.70	0.60	0.42	0.81	1.07	0.88	0.75	0.46	0.67
Nb	11.4	15.9	10.3	10.0	8.22	7.14	13.2	12.0	10.6	11.8	5.46	8.40
Zr	198	341	267	277	270	119	343	235	276	304	228	125
Hf	6.58	8.18	7.27	7.44	7.16	3.07	6.56	7.96	8.00	9.91	7.23	4.73
Y	47.5	35.8	41.1	39.6	37.4	20.4	35.4	42.2	42.9	36.5	23.6	36.3
Ni	1.33	0.95	1.16	2.80	0.70	6.11	0.14	0.93	0.44	0.33	0.13	11.5
Co	0.66	0.19	0.60	0.58	0.66	0.24	0.17	1.10	0.71	0.44	0.31	1.21
U	0.97	1.20	1.24	1.32	1.18	0.15	0.62	1.43	1.22	0.66	0.32	0.68
Pb	6.53	35.4	26.7	22.3	23.0	6.31	23.5	50.7	13.3	14.5	11.2	9.48
Sc	2.69	3.56	3.65	3.64	3.11	2.66	3.60	4.11	4.43	5.77	3.01	4.35
Cr	3.62	3.32	4.20	4.03	3.03	1.86	1.63	2.35	1.84	2.80	2.78	20.4
Ba/Ba*	0.55	0.51	1.34	1.12	1.18	0.12	0.52	0.94	1.17	0.45	0.86	0.47

续表2

序号	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
样品号	R39P2f	R39P3f	R39P7x	R40P15b	R41P2	R41P15b	R42P16n	R43P54o	R47P25n	R49P11b	R58P31	R59P8c
深度(m)	3309.96	3311.48	3316.76	3319.87	3327.14	3328.93	3337.13	3351.26	3374.12	3395.69	3473.32	3474.43
SiO ₂	73.94	75.30	78.03	76.92	77.01	79.97	78.69	75.76	78.14	77.93	77.00	77.75
TiO ₂	0.30	0.24	0.10	0.20	0.14	0.15	0.16	0.32	0.17	0.12	0.09	0.07
Al ₂ O ₃	12.46	12.34	11.17	11.54	11.62	10.49	11.76	12.22	11.40	11.45	11.82	11.47
Fe ₂ O ₃	2.65	1.95	1.17	1.86	1.31	1.54	1.33	0.90	0.58	0.65	0.26	0.67
FeO	1.01	0.75	0.36	0.62	0.48	0.68	0.48	0.63	0.56	0.47	0.88	0.34
MgO	0.16	0.08	0.04	0.12	0.11	0.14	0.15	0.20	0.06	0.06	0.08	0.09
MnO	0.06	0.09	0.03	0.04	0.06	0.04	0.06	0.07	0.05	0.02	0.01	0.01
CaO	0.49	0.36	0.26	0.28	0.36	0.46	0.30	0.48	0.20	0.27	0.90	0.33
Na ₂ O	4.93	4.26	3.88	4.14	3.68	5.41	5.98	4.56	3.74	4.14	3.76	3.60
K ₂ O	3.88	4.52	4.43	4.27	4.88	1.26	1.26	4.29	4.66	4.01	4.54	4.66
P ₂ O ₅	0.03	0.02	<0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.04	0.01	0.01	<0.01	<0.01
CO ₂	0.44	0.14	0.12	0.09	0.12	0.09	0.05	0.26	0.11	0.12	0.26	0.21
H ₂ O ⁺	0.22	0.16	0.16	0.28	0.22	0.26	0.26	0.20	0.24	0.30	0.66	0.34
Los	0.60	0.25	0.26	0.23	0.53	0.09	0.08	0.47	0.39	0.30	0.73	0.41
La	101	53.1	10.2	67.3	34.2	42.9	13.3	33.4	16.8	18.6	13.7	37.0
Ce	200	111	24.4	136	79.8	98.4	36.8	94.9	51.3	49.3	29.9	73.9
Pr	20.9	12.6	3.07	14.4	9.62	11.5	4.93	13.1	7.65	6.67	3.43	8.05
Nd	72.5	47.3	12.3	51.4	36.4	41.8	20.4	54.7	31.7	27.4	12.7	28.6
Sm	12.0	8.87	3.14	9.13	8.75	8.31	6.14	15.5	9.11	7.83	3.87	7.41
Eu	1.41	1.26	0.51	1.03	1.20	1.14	0.99	2.34	1.42	1.18	0.05	0.21
Gd	9.84	7.38	2.94	7.85	7.50	7.06	6.30	14.8	8.44	7.19	4.36	8.21
Tb	1.51	1.13	0.53	1.27	1.27	1.05	1.19	2.64	1.55	1.25	1.04	1.78
Dy	8.86	6.43	3.45	7.29	7.39	5.90	8.11	16.4	9.63	7.89	7.81	12.6
Ho	1.87	1.31	0.72	1.47	1.44	1.14	1.67	3.24	1.88	1.57	1.86	2.72
Er	6.02	4.10	2.27	4.59	4.19	3.24	5.02	9.16	5.29	4.60	6.66	8.93
Tm	0.89	0.58	0.33	0.64	0.57	0.42	0.72	1.19	0.71	0.61	1.10	1.40
Yb	6.04	4.25	2.28	4.28	3.62	2.83	4.53	7.15	4.29	3.95	7.66	9.36
Lu	0.92	0.69	0.33	0.65	0.52	0.41	0.62	0.94	0.59	0.56	1.10	1.24
ΣLREE	408.56	234.33	53.67	278.74	169.92	204.06	82.53	213.96	117.95	110.87	63.58	155.17
ΣHREE	35.95	25.86	12.84	28.03	26.50	22.06	28.16	55.49	32.39	27.61	31.60	46.23
L/H	11.36	9.06	4.18	9.94	6.41	9.25	2.93	3.86	3.64	4.02	2.01	3.36
Eu/Eu*	0.38	0.46	0.50	0.36	0.44	0.44	0.48	0.47	0.49	0.47	0.04	0.08
Sr	29.5	54.6	26.8	22.5	50.8	72.7	56.7	20.0	35.4	11.8	26.7	51.0
Rb	84.0	71.4	95.1	92.6	110	25.6	25.4	97.5	90.7	102	227	135
Ba	266	610	373	294	264	244	108	113	117	44.8	60.0	166
Th	13.5	8.70	17.0	12.2	10.7	24.7	7.81	4.46	12.0	7.59	16.1	27.5
Ta	1.34	0.75	0.48	0.93	0.78	1.30	1.11	1.54	1.07	0.81	5.91	2.89
Nb	18.6	14.4	5.67	15.0	8.87	13.6	13.2	21.9	14.2	9.25	34.5	32.8
Zr	566	356	124	487	258	154	196	319	173	219	167	178
Hf	17.9	11.7	4.25	14.7	7.98	5.61	6.42	10.8	5.89	6.64	9.36	7.70
Y	51.3	33.4	18.5	38.8	35.5	32.9	44.9	89.2	49.4	42.8	70.4	77.7
Ni	0.26	<0.05	0.35	0.17	0.39	0.47	0.26	1.17	0.64	0.26	1.01	0.64
Co	0.69	0.33	0.12	0.40	0.57	0.80	0.45	0.38	0.26	0.41	0.49	0.27
U	0.69	0.83	0.74	1.15	0.73	1.16	0.91	0.50	1.38	0.56	2.14	3.10
Pb	7.05	24.1	19.7	16.9	19.9	8.44	6.50	14.0	18.4	15.9	28.2	23.9
Sc	9.65	7.49	3.41	4.91	5.14	5.07	4.25	6.16	3.43	4.11	0.57	0.47
Cr	2.89	2.39	2.38	1.98	3.18	3.22	2.18	3.35	3.18	0.98	0.43	<0.1
Ba/Ba*	0.24	0.77	0.28	0.27	0.24	0.18	0.21	0.16	0.11	0.05	0.03	0.08

注:氧化物单位为%;稀土元素和微量元素单位为 $\mu\text{g/g}$;L/H=LREE/HREE;由国家分析测试中心测定。

MgO、MnO的含量明显偏低,其中FeO=0.13%~0.63%,大部分小于0.2%,MnO=0.01%~1.13%,Fe₂O₃=0.26%~2.12%,MgO=0.04%~0.11%,岩石强烈贫钙,富含钾、钠,CaO=0.17%~

1.59%，K₂O 和 Na₂O 的含量分别为 1.74%~5.98%和 1.26%~5.67%。

3.3 花岗质片麻岩的稀土元素和微量元素的成分特征

根据稀土元素球粒陨石配分模式和微量元素洋中脊玄武岩标准化蛛网图特征,可将花岗质片麻岩分为以下五种类型。第一种类型位于 3057.58~3060.00 m、3086.45~3139.39 m、3253.33~3258.96 m、3264.50~3271.39 m、3285.47~3291.99 m、3305.64~3320.82 m、3328.75~3331.74 m 深度范围内。在稀土元素球粒陨石标准化图解上(图2a、c),该类正片麻岩表现出明显的轻、重稀土分馏和较强的负 Eu 异常, $Eu/Eu^* = 0.159 \sim 0.483$, 平均值为 0.337。LREE = 206.21~408.56 $\mu\text{g/g}$, HREE = 24.02~40.78 $\mu\text{g/g}$, 相应的 LREE/HREE = 6.33~13.68。在洋脊玄武岩蛛网图上(图2b、d),第一类岩石除样品 R33P24 的 Ba 异常不明显外 ($Ba/Ba^* = 0.911$),其余均表现为明显的负 Ba 异常, $Ba/Ba^* = 0.243 \sim 0.66$, 平均值为 0.395。岩石表现出强烈富集大离子亲石元素(K、Rb、Th)的特点,高场强元素的特征不尽相同, Ti、Ta、Nb 表现为明显的负异常,而 Hf、Zr 则相对富

集。P 表现为强烈的负异常。上述特征与主孔 1210.8~1594.4 m、2559.85~2649.06 m 花岗质片麻岩特征相似(刘福来等,2004,2005b)。

第二种类型分布于 3086.45~3168.66 m、3253.33~3258.96 m、3264.50~3284.12 m、3291.99~3297.36 m、3305.64~3331.74 m、3338.86~3350.89 m 深度范围内。与第一种类型正片麻岩相比,该类正片麻岩具有明显的负 Eu 异常, Ba 既有正异常,也有明显的负异常, $Eu/Eu^* = 0.378 \sim 0.676$, 平均值为 0.531, $Ba/Ba^* = 0.161 \sim 1.798$ 。在稀土元素球粒陨石标准化图解上(图3a、c、e、g),轻稀土明显富集,重稀土明显亏损,其 LREE = 82.05~312.19 $\mu\text{g/g}$, HREE = 14.31~36.73 $\mu\text{g/g}$, 相应的 LREE/HREE 变化于 5.23~11.86 之间。在洋脊玄武岩标准化蛛网图上(图3b、d、f、h),该类岩石同样表现出富集大离子亲石元素(K、Rb、Th)、高场强元素特征不同(Ti、Ta、Nb 为明显负异常, Hf、Zr 相对富集)的特点。P 表现出强烈的负异常。上述特征与主孔 1113.14~1198.10 m、2055~2182.04 m、2272.84~2340.47 m 和 2466.04~2559.85 m 花岗质片麻岩的特征相似(刘福来等,2004,2005b)。

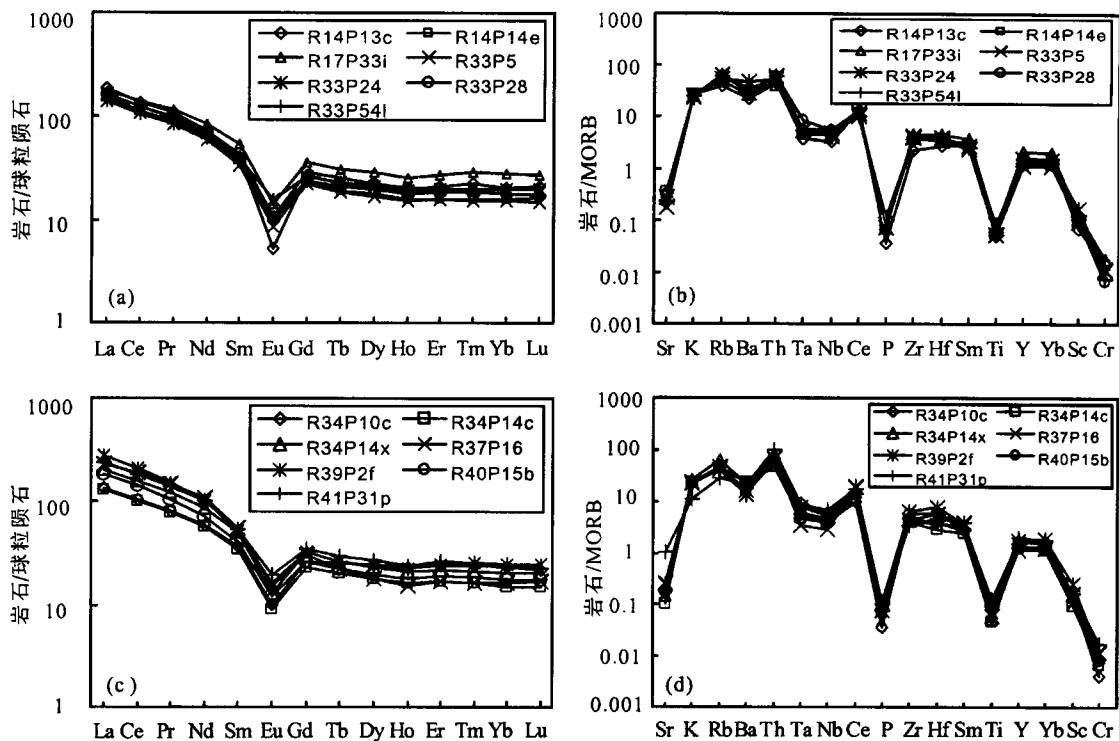


图 2 中国大陆科学钻探工程主孔3000~3500 m 第一类花岗质片麻岩的稀土元素和微量元素配分模式
 Fig. 2 Chondrite-normalized REE patterns and ocean ridge-normalized trace earth element patterns of the first group granitic gneiss in the depth interval 3000~3500 m from drillhole CCSD-MH

第三类分布于3253.33~3258.96 m、3302.83~3304.65 m、3305.64~3328.75 m、3334.80~3358.90 m、3359.68~3374.22 m、3376.40~3397.11 m深度范围内。与第一类相比, Eu呈相对

弱的负异常。与第二类相比,除样品 R33P54u 的 Ba 负异常较弱外,其余样品 Ba 均表现出强烈的负异常, $Ba/Ba^* = 0.05 \sim 0.643$, 平均值为 0.26。在稀土元素球粒陨石标准化图解上(图 4a、c、e、g), 该类岩

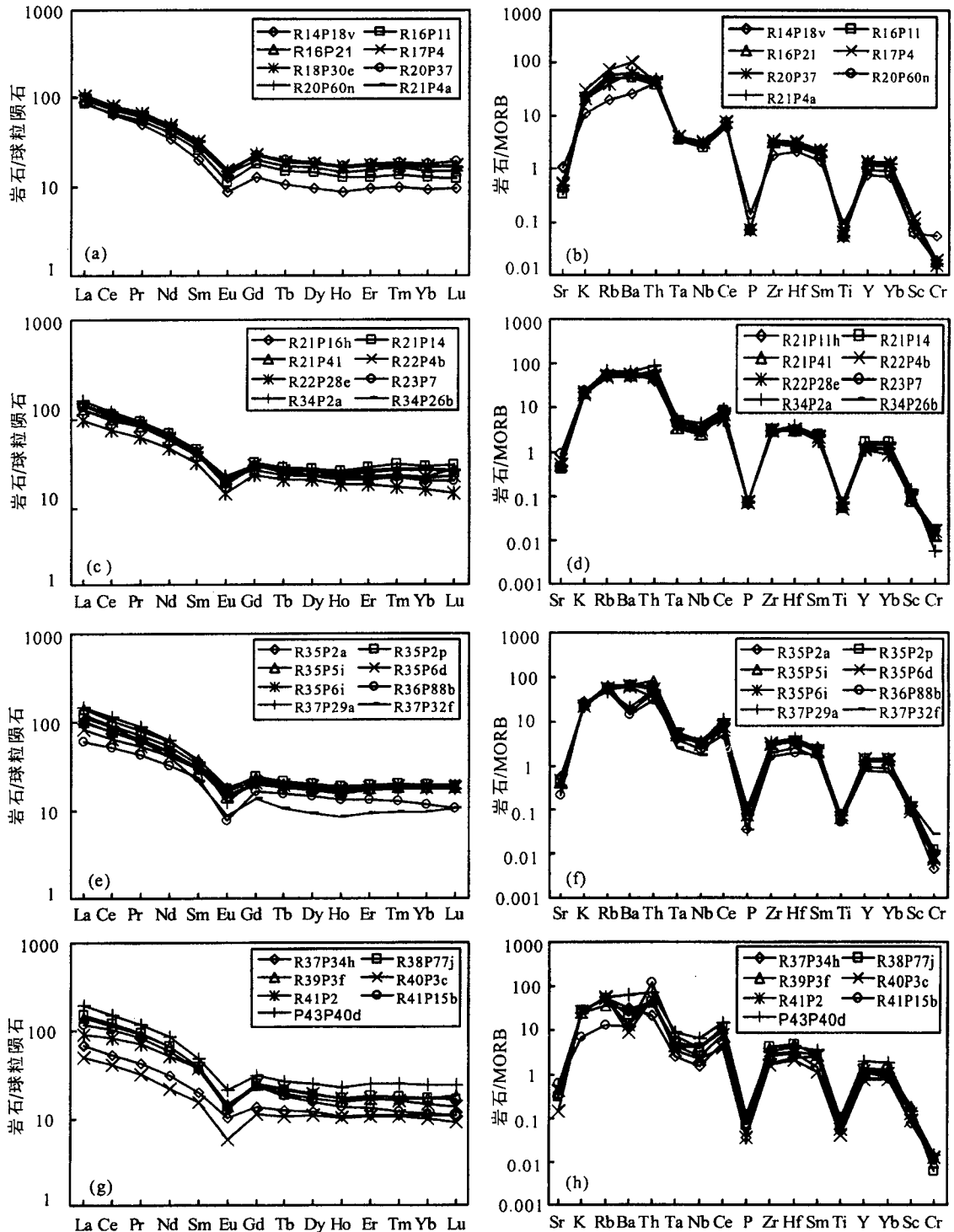


图 3 中国大陆科学钻探工程主孔3000~3500 m 第二类花岗质片麻岩的稀土元素和微量元素配分模式

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns and ocean ridge-normalized trace earth element patterns of the second group granitic gneiss in the depth interval 3000~3500 m from drillhole CCSD-MH

石具中等程度的 Eu 负异常和一定程度的轻、重稀土分馏,曲线相对平坦,其 LREE 变化于 53.67~213.96 $\mu\text{g/g}$ 之间,HREE 变化于 12.84~55.49 $\mu\text{g/g}$ 之间,相应的 LREE/HREE 变化于 2.82~6.80 之间, $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.383\sim 0.647$, 平均值为 0.472。其稀

土元素含量总体比前两类低。在洋脊玄武岩标准化蛛网图上(图 4b、d、f、h),该类岩石同样表现出富集大离子亲石元素(K、Rb、Th)的特点,高场强元素 Ti、Ta、Nb 相对亏损,Hf、Zr 相对富集。P 表现出强烈的负异常。

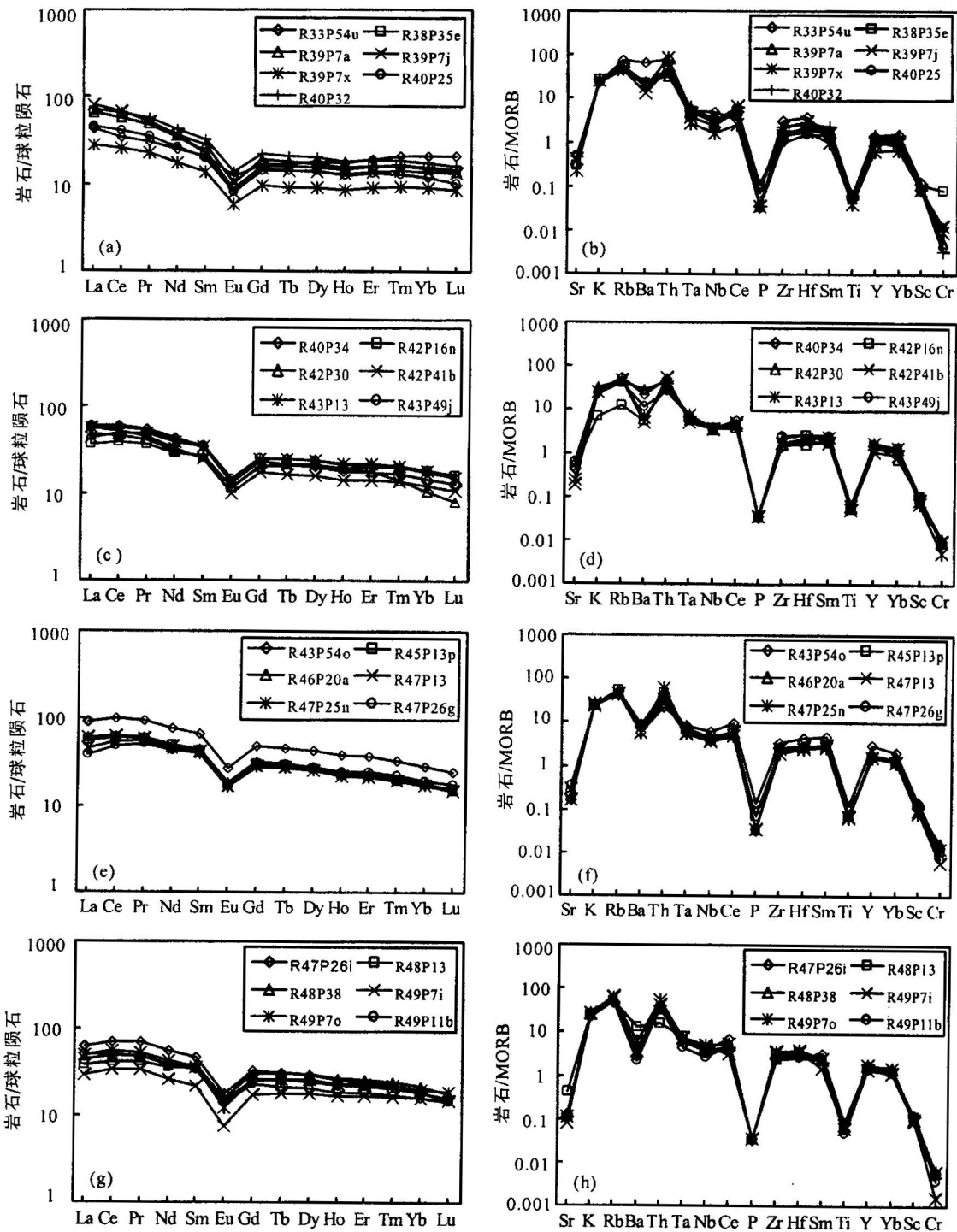


图 4 中国大陆科学钻探工程主孔3000~3500 m 第三类花岗质片麻岩的稀土元素和微量元素配分模式

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns and ocean ridge-normalized trace earth element patterns of the third group granitic gneiss in the depth interval 3000~3500 m from drillhole CCSD-MH

第四种类型分布于3470.07~3481.38 m 深度范围内。在稀土元素球粒陨石标准化图解上(图5a), 该花岗质片麻岩表现出异常强烈的负Eu异常, $Eu/Eu^* = 0.035 \sim 0.082$, 平均值为0.0485。稀土元素球粒陨石标准化曲线呈“V”字型特点。具一定程度的轻、重稀土分馏, $LREE = 63.58 \sim 195.62 \mu\text{g/g}$, $HREE = 31.60 \sim 60.87 \mu\text{g/g}$, 相应的 $LREE/HREE = 2.01 \sim 3.36$ 。在洋脊玄武岩(MORB)标准化蛛网图上(图5b), 该类岩石表现出强烈富集大离子亲石元素(K、Rb、Th)的特点, Ba表现出强烈的负异常, $Ba/Ba^* = 0.009 \sim 0.081$, 平均值只有0.033。高场强元素Ti呈明显的负异常, 而Nb、Ta、Zr、Hf不具备这样的特征。P为明显的负异常。上述特征与主孔2348.3~2463.83 m和2871.7~3000 m花岗质片麻岩的性质相似(刘福来等, 2005b)。

第五类共有两个样品, 分布于3244.33~3253.33 m和3271.39~3284.12 m深度范围内。在稀土元素球粒陨石标准化图解上(图5c), 该类岩石表现出强烈的Eu负异常, Eu/Eu^* 分别为0.243和0.37。具有弱的轻、重稀土分馏, LREE 分别为 $31.29 \mu\text{g/g}$ 和 $31.38 \mu\text{g/g}$, HREE 分别为 $12.56 \mu\text{g/g}$ 和 $8.1 \mu\text{g/g}$, 相应的 $LREE/HREE$ 为2.49和3.87。稀

土含量低, 分别为 $43.85 \mu\text{g/g}$ 和 $39.48 \mu\text{g/g}$ 。稀土元素分配曲线相对平坦。在洋脊玄武岩标准化蛛网图上(图5d), Ba表现出明显的负异常, Ba/Ba^* 分别为0.121和0.043。样品R31P44a富集大离子亲石元素K和Rb, 样品R36P19f富集K、Rb、Th, 高场强元素的特征不尽相同, Ti强烈亏损, 而Nb、Ta、Zr、Hf不具有此特征。P强烈亏损。

4 中国大陆科学钻探工程主孔3000~3500 m 花岗质片麻岩的原岩性质及成因环境

前人大量的研究表明, 变质作用特别是高级变质作用大多不是等化学过程, 大离子亲石元素如Sr、K、Rb和Ba等属于活动性元素, 其含量会出现明显变化(Arculus et al., 1999; Becker et al., 2000), 重稀土元素、高场强元素(如Zr、Ti、Hf、Y和Nb)和过渡族元素(如Cr、Ni、V)的性质较稳定, 在变质过程中属于非活动性元素, 它们的地球化学特征能较好地反映原岩的性质(Zheng et al., 2004; Grauch, 1989; Becker et al., 2000; Polat et al., 2002)。薛怀民等(2005)也认为 SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO^* (全铁)、CaO、MgO、Cr、Ni、V、Co、Fe、Mn、Cu、Zn、Sc和重稀

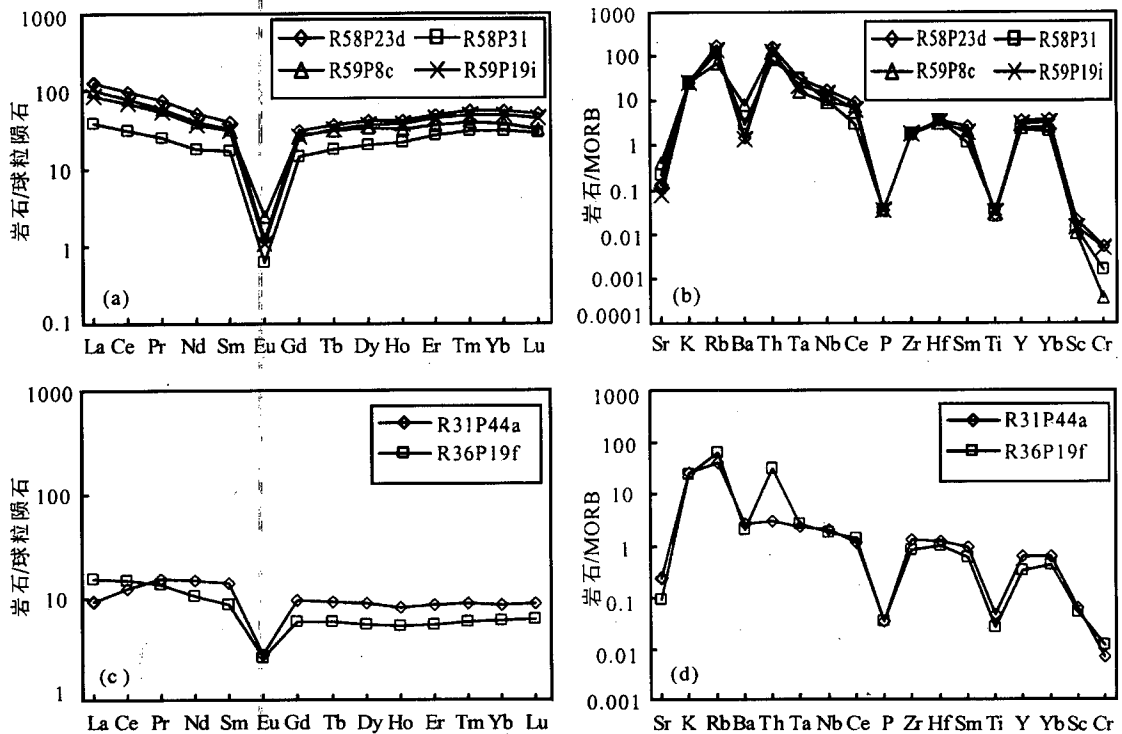


图5 中国大陆科学钻探工程主孔3000~3500 m 第四类和第五类花岗质片麻岩的稀土元素和微量元素配分模式
 Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns and ocean ridge-normalized trace earth element patterns of the forth and fifth group granitic gneiss in the depth interval 3000~3500 m from drillhole CCSD-MH

土元素及 Y 在变质过程中属于不活动元素, Sr、Nb、Ta、Zr 和 Hf 属于准不活动元素, 可有效地应用于对变质岩原岩的恢复。因此, 本文利用这些非活动性元素, 试图从地球化学角度探讨花岗质片麻岩的原岩性质及成因。

在阳离子标准矿物成分 $Q/(Q+Or+Ab+An)-An/(Or+An)$ 分类图解中, 绝大多数样品落入碱性花岗岩区, 少数样品落入正长花岗岩和二长花岗岩区 (图 6); 在 An-Ab-Or 分类图解中, 绝大多数样品落入花岗岩区, 少数落入奥长花岗岩区 (图 7); 在 $Zr/TiO_2 \times 0.0001-SiO_2$ 分类图解中, 所有样品的成分均落入流纹岩区 (图 8); 在 $Nb/Y-Zr/TiO_2 \times 0.0001$ 分类图解中, 绝大多数样品成分落入流纹岩区, 少数样品成分落入流纹英安岩/英安岩区 (图 9); 在 A/NK-A/CNK 图解中, 绝大多数成分点分布在过铝质和准铝质交界附近, 个别样品为过铝质岩石 (图 10)。以上特征表明主孔正片麻岩的原岩为富含碱性长石的花岗质岩石。

在 K_2O-Na_2O 成因分类图解中 (张玉泉等, 1987), 绝大多数样品落入 A 型花岗岩区, 少数落入 I 型和 S 型区 (图 11); 在 $10000Ga/Al-Nb$ 和 $10000Ga/Al-Zr$ (王强等, 2000) 成因分类图解中, 所

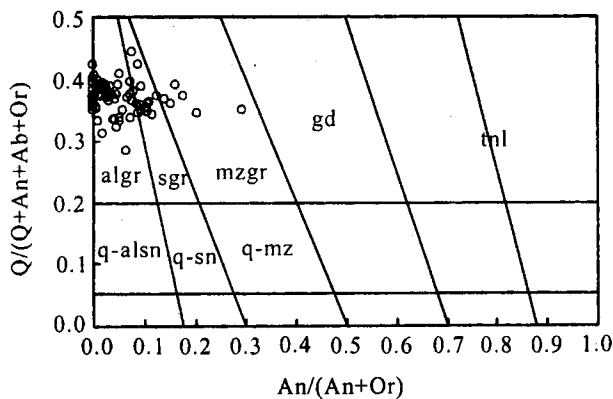


图 6 中国大陆科学钻探工程主孔3000~3500 m 花岗质片麻岩的标准矿物 $Q/(Q+Ab+An+Or)-An/(Or+An)$ 分类图解 (据 Streckeisen 等, 1979)

Fig. 6 $Q/(Q+Ab+An+Or)$ vs. $An/(Or+An)$ diagram (after Streckeisen et al., 1979) of composition of granitic gneiss samples in the depth interval 3000~3500 m from drillhole CCSD-MH

algr—碱性花岗岩; sgr—正长花岗岩; mzgr—二长花岗岩; gd—花岗岩闪长岩; q-alsn—石英碱性长石正长岩; q-sn—石英正长岩; q-mz—石英二长岩; tnl—英云闪长岩

algr—Alkaline granite; sgr—syenogranite; mzgr—monzogranite; gd—granodiorite; q-alsn—quartz alkaline syenite; q-sn—quartz syenite; q-mz—quartz monzonite; tnl—tonalite

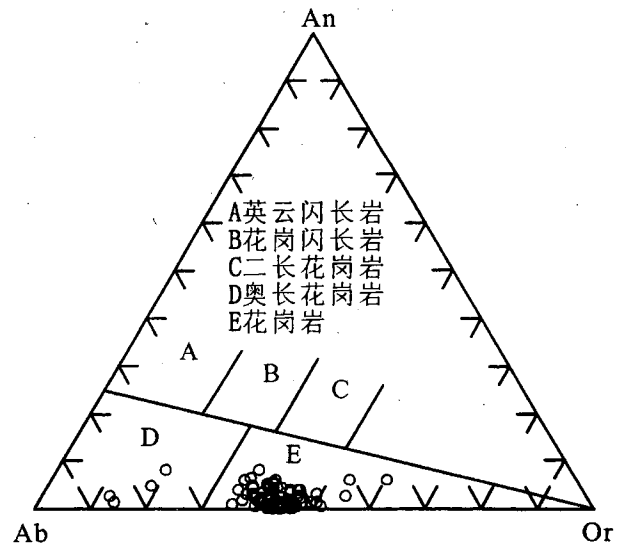


图 7 中国大陆科学钻探工程主孔3000~3500 m 花岗质片麻岩的 An-Ab-Or 分类图解 (据 O'Connor, 1965)
Fig. 7 An-Ab-Or diagram (after O'Connor, 1965) of granitic gneiss samples in the depth interval 3000~3500 m from drillhole CCSD-MH

有样品都落入 A 型花岗岩区 (图 12a, b); 在 $SiO_2-(FeO+Fe_2O_3)/MgO$ (Eby, 1990) 成因分类图解中, 绝大多数样品落入 A 型花岗岩区, 少数落入 I 和 S 型花岗岩区 (图 12f); 在 $Zr+Nb+Ce+Y/10^{-6}-(Na_2O+K_2O)/CaO$ 和 $Zr+Nb+Ce+Y/10^{-6}-$

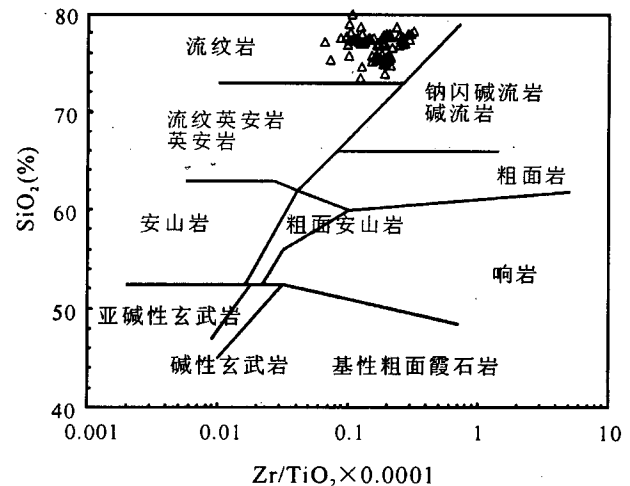


图 8 中国大陆科学钻探工程主孔3000~3500 m 花岗质片麻岩的 SiO_2-Zr/TiO_2 分类图解 (据 Winchester and Floyd, 1977)

Fig. 8 SiO_2 vs. Zr/TiO_2 diagram (after Winchester and Floyd, 1977) of granitic gneiss samples in the depth interval 3000~3500 m from drillhole CCSD-MH

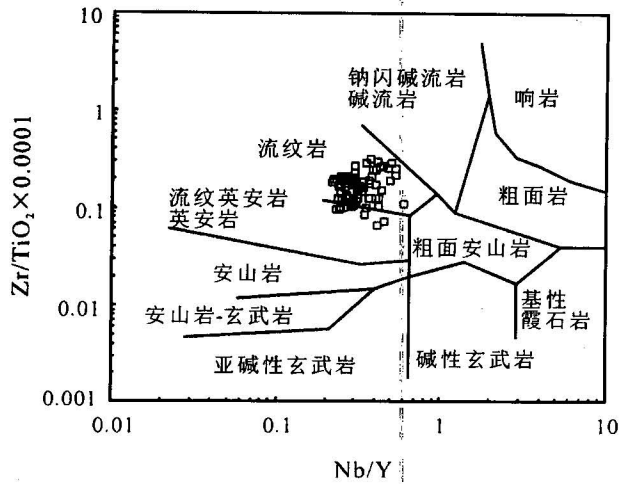


图9 中国大陆科学钻探工程主孔3000~3500 m 花岗质片麻岩的 Zr/TiO₂-Nb/Y 分类图解 (据 Winchester and Floyd, 1997)

Fig. 9 Zr/TiO₂ vs. Nb/Y diagram (after Winchester and Floyd, 1997) of granitic gneiss samples in the depth interval 3000~3500 m from drillhole CCSD-MH

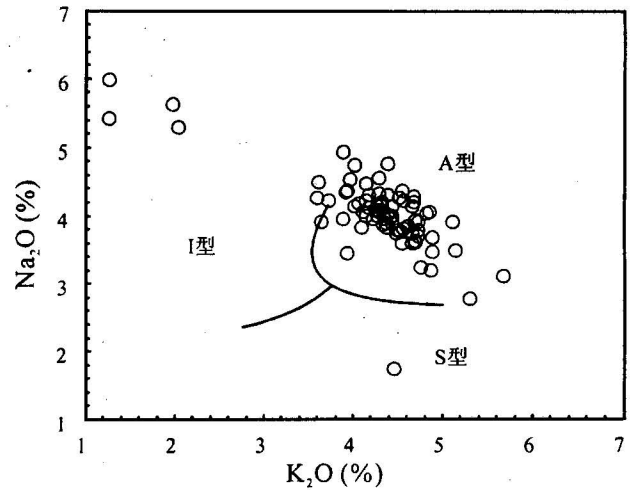


图11 花岗岩的成因分类图解(据张玉泉等, 1987)

Fig. 11 Genetic diagram of granite (after Zhang et al., 1987)

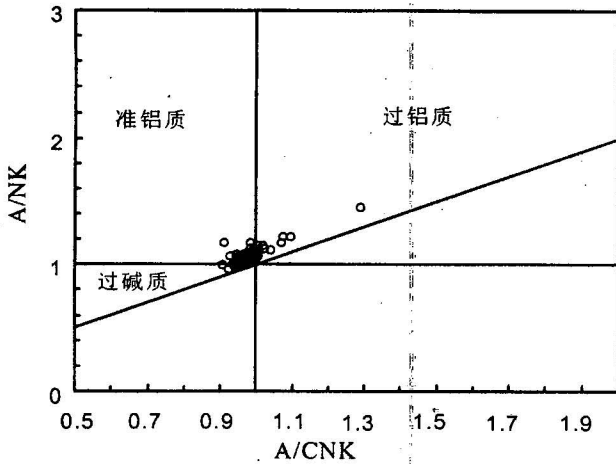


图10 中国大陆科学钻探工程主孔3000~3500 m 花岗质片麻岩的 A/NK-A/CNK 分类图解

Fig. 10 A/NK vs. A/CNK diagram of granitic gneiss samples in the depth interval 3000~3500 m from drillhole CCSD-MH

(FeO + 0.9Fe₂O₃)/MgO 分类图解中 (Whalen et al., 1987), 多数样品落入 A 型花岗岩区域, 少数样品落入其他类型的花岗岩区域 (图 12c、d); 在 Zr + Nb + Ce + Y/10⁻⁶ - 1000Ga/Al (Eby, 1990) 成因分类图解中, 部分样品落入 A 型花岗岩区域, 部分样品落入分异的花岗岩区域, 没有一个样品成分落入未分异的花岗岩区域 (图 12e)。这些特征说明中国大陆

科学钻探工程主孔 3000~3500 m 范围内的正片麻岩的原岩都具有 A 型花岗岩的特征。

在 Nb-Y 成因判别图解中 (Pearce, 1984), 部分样品落入板内花岗岩区, 另一部分落入同碰撞和火山弧花岗岩区 (图 13a); 在区分火山弧花岗岩和同碰撞花岗岩的 Rb-(Nb+Y) 成因判别图解中 (Pearce, 1984), 部分样品落入板内花岗岩区, 部分样品落入火山弧花岗岩区, 但大部分样品分布在板内花岗岩与火山弧花岗岩区的交线附近, 没有一件落入同碰撞花岗岩区 (图 13b)。

苏鲁地体新元古代晚期处于扬子板块北缘, 而该时期是 Rodinia 超大陆裂解的主要地质时期 (Tassinari et al., 2001; Acharyya, 2000; Condie, 2001)。全球 Rodinia 超大陆裂解事件的地质标志是 A 型花岗岩与基性岩墙 (脉) 的产出 (Tassinari et al., 2001), 而这一特征在柴达木北缘 (陆松年, 2002)、南秦岭和华南地区 (周鼎武等, 1998) 都有记录。研究表明它们形成于新元古代大陆裂谷环境, 为记录 Rodinia 超大陆裂解事件的重要构造带。苏鲁造山带中大规模的新元古代 A 型花岗岩组成, 花岗岩中大量基性岩产出, 同样记录了 Rodinia 超大陆裂解事件中苏鲁地区新元古代的花岗岩浆和基性岩浆事件。

综上所述, 笔者认为苏鲁地体在新元古代晚期处于大陆裂谷环境, 中国大陆科学钻探工程主孔 3000~3500 m 的花岗质片麻岩的原岩为新元古代晚期形成于裂谷环境下的 A 型花岗岩。

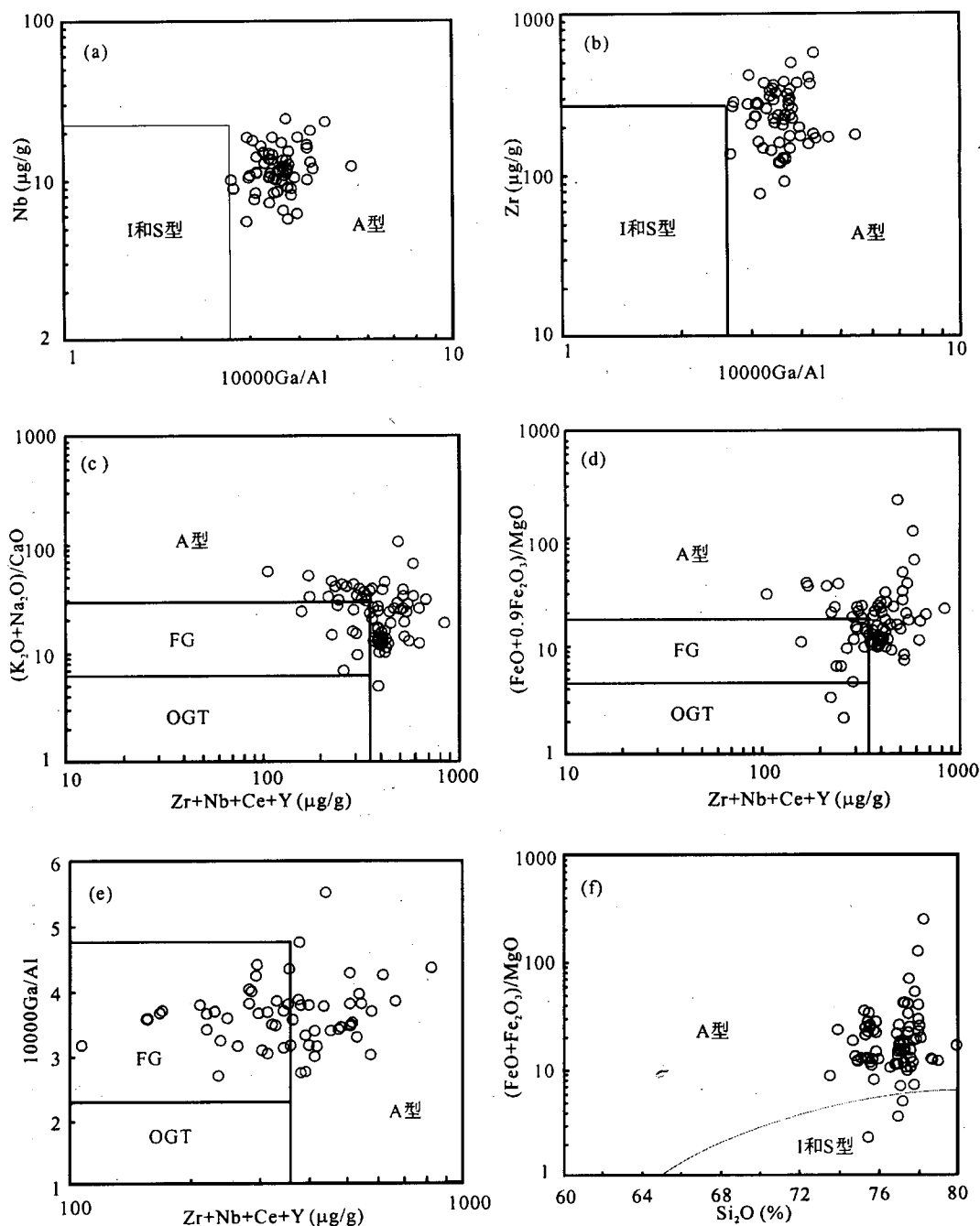


图 12 花岗岩的成因分类图解(据 Whalen et al. , 1987;Eby,1990;王强等,2000)

Fig.12 Genetic diagram of granite (after Whalen et al. , 1987;Eby,1990;Wang et al. , 2000)

FG—分异的 M+I+S 型花岗岩;OGT—未分异的 M+I+S 型花岗岩

FG—Fractionated granite of M, I and S-type granite;OGT—non-fractionated granite of M, I and S-type granite

5 结论

(1) 中国大陆科学钻探工程主孔 (CCSD-MH) 3000~3500 m 范围内,揭示的主要岩石类型以正、副片麻岩为主,夹少量的榴辉岩、片岩及斜长角闪岩等,与主孔2000~3000 m 的岩石组合特征相似。

(2) 根据花岗质片麻岩的浅色矿物组成及相对含量的详细研究,中国大陆科学钻探工程主孔3000~3500 m 花岗质片麻岩为钾长花岗质片麻岩和二长花岗质片麻岩。钾长花岗质片麻岩主要为含石榴钾长花岗质片麻岩、含黑云母钾长花岗质片麻岩、多硅白云母钾长花岗质片麻岩、含磁铁矿钾长花岗质

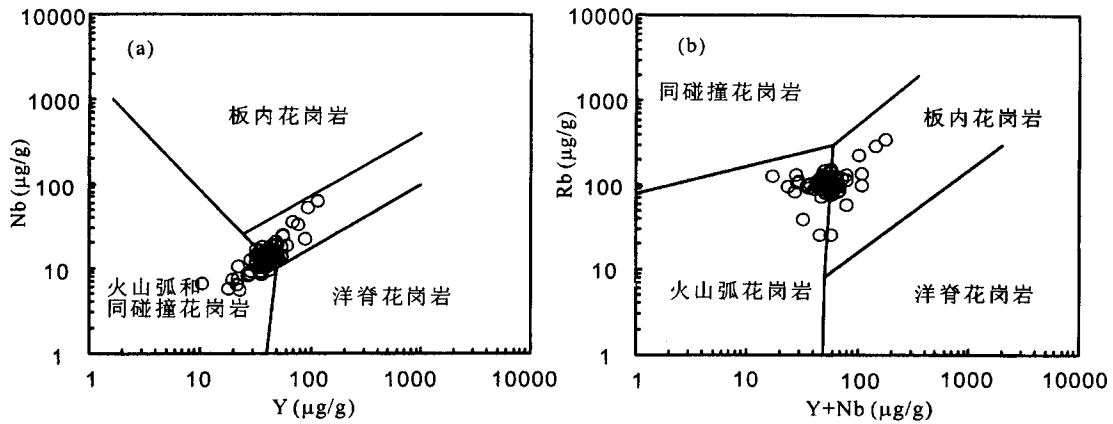


图 13 花岗岩成因的 Nb-Y 和 Rb-(Nb+Y) 构造环境判别图解(据 Pearce, 1984)

Fig. 13 Nb versus Y and Rb versus Nb+Y tectonic discrimination diagram (after Pearce, 1984)

片麻岩、含角闪石钾长花岗质片麻岩、二云钾长花岗质片麻岩及基本不含其他暗色矿物的钾长花岗质片麻岩。二长花岗质片麻岩主要为二云二长花岗质片麻岩、含磁铁矿二长花岗质片麻岩、含磁铁矿二云二长花岗质片麻岩、黑云二长花岗质片麻岩、含石榴黑云二长花岗质片麻岩、多硅白云母二长花岗质片麻岩、含石榴黑云二长花岗质片麻岩。

(3) 中国大陆科学钻探工程主孔3000~3500 m 花岗质片麻岩主元素具相似的地球化学特征, 表现为 SiO_2 含量普遍高, 为 73.56%~78.32%, 平均值为 75.75%, Al_2O_3 含量为 10.49%~13.75%, 平均值为 11.71%; 而 TiO_2 、 Fe_2O_3 、 FeO 、 MnO 和 MgO 的含量明显偏低, 其中 Fe_2O_3 为 0.26%~2.56%, FeO 为 0.09%~1.13%, MgO 为 0.01%~0.63%; 岩石明显富含 Na_2O 、 K_2O , 强烈贫钙, 其中 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 的含量为 6.20%~9.15%, K_2O 的含量为 1.26%~5.67%。但钾长花岗质片麻岩与二长花岗质片麻岩主元素地球化学特征也存在明显的差别, 表现为钾长花岗质片麻岩的 SiO_2 与 TiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 Na_2O 具有比较明显的负相关性, 而与其他主元素的相关性不明显, 二长花岗质片麻岩的 SiO_2 只与 Al_2O_3 具有较明显的负相关性, 而与其他主元素的相关性不明显。

(4) 中国大陆科学钻探工程主孔3000~3500 m 花岗质片麻岩在洋脊玄武岩标准化蛛网图上都表现出强烈富集大离子亲石元素(K、Rb、Th)的特点, 高场强元素 Ti、Ta 和 Nb 表现为明显的负异常, 而 Hf 和 Zr 则为明显正异常。而根据稀土元素配分模式则主要分为五种类型。第一类花岗质片麻岩表现为强

烈的轻、重稀土分馏和较强的负 Eu 异常, $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.159 \sim 0.483$, 平均值为 0.337。除个别样品外, 其余均表现为明显的负 Ba 异常, $\text{Ba}/\text{Ba}^* = 0.243 \sim 0.66$, 平均值为 0.395。第二类花岗质片麻岩具有明显的负 Eu 异常, Ba 既有正异常, 也有负异常, $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.378 \sim 0.676$, 平均值为 0.531, $\text{Ba}/\text{Ba}^* = 0.161 \sim 1.798$ 。轻稀土明显富集, 重稀土明显亏损。第三类花岗质片麻岩呈中等程度 Eu 负异常, $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.383 \sim 0.647$, 平均值为 0.472, 弱的轻、重稀土分馏, 其稀土元素含量总体比前两类低。除个别样品外, 其余样品 Ba 均表现出强烈的负异常, $\text{Ba}/\text{Ba}^* = 0.05 \sim 0.643$, 平均值为 0.26。第四类花岗质片麻岩表现出异常强烈的负 Eu 异常, $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.035 \sim 0.082$, 平均值为 0.0485。稀土元素球粒陨石标准化曲线呈“V”字型特点。具明显的轻、重稀土分馏, $\text{Ba}/\text{Ba}^* = 0.009 \sim 0.081$, 平均值只有 0.033。第五类花岗质片麻岩只有两个样品, 表现出强烈的 Eu 负异常和弱的轻、重稀土分馏的特点, 稀土含量低, Eu/Eu^* 分别为 0.243 和 0.37。Ba 表现出明显的负异常, Ba/Ba^* 分别为 0.121 和 0.043。其中第一、第二、第四类在主孔 0~3000 m 存在性质相似的花岗质片麻岩。

(5) 中国大陆科学钻探工程主孔3000~3500 m 花岗质片麻岩的地球化学特征显示其原岩具 A 型花岗岩的特征, 形成于拉张作用下的大陆裂谷环境。苏鲁地区大量分布的新元古代 A 型花岗岩记录了 Rodinia 超大陆裂解时的花岗岩浆事件, 表明新元古代晚期扬子板块北缘的构造属性为大陆裂谷环境。

参 考 文 献

- 樊金涛. 2000. 苏北牛山花岗片麻岩原岩成因类型、成岩时代及其地质意义. 前寒武纪研究进展, 23(4): 213~220.
- 江世俊, 李美美. 1995. 桐柏—大别地区花岗质片麻岩系地质—地球化学特征. 湖北地质, 9(2): 53~64.
- 李永刚, 郭敬辉, 翟明国, 刘军文, 关涛. 1999. 胶东地区基底长英质片麻岩的地球化学特征及其构造归属. 岩石学报, 15(4): 557~563.
- 凌文黎, 张宏飞, 高山, 钟增球, 韩吟文, 徐启东. 2000. 大别超高压变质过程中部分熔融作用的地球化学约束. 地球科学—中国地质大学学报, 25(6): 573~578.
- 刘福来, 许志琴, 杨经绥, 张泽明, 薛怀民, 李天福. 2004. 中国大陆科学钻探工程主孔及周边地区花岗质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.
- 刘福来, 许志琴, 薛怀民, 孟繁聪. 2005a. 中国大陆科学钻探工程主孔 0~4500 m 变质岩石榴石中保存的超高压矿物包体. 岩石学报, 21(2): 277~292.
- 刘福来, 许志琴, 杨经绥, 张泽明, 薛怀民, 孟繁聪, 李天福. 2005b. 中国大陆科学钻探工程主孔 2000~3000 m 正、副片麻岩的地球化学性质及其成因机制. 岩石学报, 21(2): 305~324.
- 陆松年. 2002. 青藏高原北部前寒武纪地质初探. 北京: 地质出版社, 1~125.
- 陆松年, 李怀坤, 陈志宏, 于海峰, 金巍, 郭坤一. 2004. 新元古时期中国古大陆与罗迪尼亚超大陆的关系. 地学前缘, 11(2): 515~523.
- 钱存超, 路玉林. 1999. 大别山超高压变质带中 A 型花岗岩的确定及成因探讨. 安徽地质, 9(3): 165~171.
- 孙海婷, 王汝成, 徐士进, 方中, 徐树桐, 吴维平. 2002. 大别山中段超高压变质带中变质花岗岩的矿物化学和地球化学特征. 高校地质学报, 8(1): 25~39.
- 唐俊, 郑永飞, 吴元保, 查向平, 周建波. 2004. 胶东地块东部变质岩锆石 U-Pb 定年和氧同位素研究. 岩石学报, 20(5): 1039~1062.
- 王来明, 王世进, 张富中. 2001. 2001 年山东省地质调查工作进展和主要成果. 山东地质, 17(6): 1~6.
- 王强, 赵振华, 熊小林. 2000. 桐柏—大别造山带燕山晚期 A 型花岗岩的厘定. 岩石矿物学杂志, 19: 297~306.
- 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): 1~8.
- 薛怀民, 刘福来. 2005. 中国大陆科学钻探工程主孔 0~2000 m 斜长片麻岩的地球化学性质及成因研究. 岩石学报, 21(2): 355~368.
- 薛怀民, 刘福来, 孟繁聪. 2006. 苏鲁造山带胶东区段花岗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(7): 1779~1790.
- 游振东, 苏尚国, 梁风华, 张泽明. 2004. 中国大陆科学钻探主孔 100~2000 m 超高压变质岩岩相学特征与变质变形史. 岩石学报, 20(1): 43~52.
- 张玉泉, 谢应雯, 涂光焱. 1987. 哀牢山—金沙江富碱侵入岩及其与裂谷构造关系初步研究. 岩石学报, 3: 17~27.
- 郑祥身, 金成伟, 翟明国, 石永红. 1999. 北大别灰色片麻岩的岩石学特征及大地构造背景. 岩石学报, 15(3): 350~358.
- 郑永飞. 2003. 新元古代岩浆活动与全球变化. 科学通报, 48(16): 1705~1720.
- 钟增球, 张宏飞, 索书田, 游振东. 1999. 大别超高压变质岩折返过程中的部分熔融作用. 地球科学—中国地质大学学报, 24(4): 393~399.
- 周鼎武, 董云鹏, 刘良, 王居里, 刘颖宇, 张旗, 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.
- Acharya S K. 2000. Break up of Australia-India-Madagascar Block, Opening of the Indian Ocean and Continental Accretion in Southeast Asia with special reference to the characteristic of the pre-Indian Collision Zones. Gondwana Research, 3(4): 425~443.
- 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.
- Arculus R J, Lapierre H, Jaillard E. 1999. Geochemical window into subduction and accretion processes; Easpas metamorphic complex Ecuador. Geology, 27: 547~550.
- Becker H, Jochum K P, Karlson R W. 2000. Trace element fractionation during dehydration of eclogites from high-pressure terranes and the implication for element fluxes in subduction zones. Chemical Geology, 163: 65~99.
- Condie K C. 2001. Continent growth during formation of Rodinia at 1.36~0.9 Ga. Gondwana Research, 4(1): 5~6.
- Dalziel I W D. 1991. Pacific margins of Laurentia and East Antarctica—Australia as a conjugate rift pair; Evidence and implication for an Eocambrian supercontinent. Geology, 19: 598~601.
- Eby G N. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculation on their petrogenesis. Lithos, 26: 115~134.
- Grauch L. 1989. Rare earth elements in metamorphic rocks. In: Lipin B R, Mckay G A, eds. Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements. Rev. Mineral., 21: 147~167.
- Hoffmen P F. 1991. Did the breakup of Laurentia turn Gondwana inside out? Science, 252: 1409~1412.
- Liu Fulai, Xu Zhiqin, Ikuo Katayama, Yang Jingsui, Shigenori Maruyama, Liou J G. 2001. Mineral inclusions in zircons of para- and orthogneiss from pre-pilot drillhole CCSD-PP1, Chinese Continental Scientific Drilling Project. Lithos, 59: 199~215.
- Mcmenamin M A S, Mcmenamin D L S. 1990. The emergence of animals: The Cambrian Breakthrough. New York: Columbia University Press, 1~12.
- O'Connor J T. 1965. A classification for quartz-rich igneous rock based feldspar ratios. USGS Prof. Paper 525B, B79~B84.
- Pearce J A. 1984. Trace element discrimination diagram for tectonic interpretation of granitic rocks. J. Petrol., 25: 656~682.
- Polat A, Hofmann A W, Rosing M T. 2002. Boninite-like volcanic rocks in the 3.7~3.8 Ga Isua greenstone belt, west Greenland: geochemical evidence for intra-oceanic subduction zone processes in the early earth. Chemical Geology, 184: 231~254.
- Streckeisen A, Le Maitre R W. 1979. A chemical approximation of the model QAPE classification of the igneous rocks. Neues Jahrbuch fur Mineralogie Abhandlungen, 136: 169~206.
- Tassinari C C G, Munha J M U, Ribeiro A, Correeia C T. 2001. Neoproterozoic oceans in the Rodinia belt (southern Brazil): The Pirapora do bom Jesus ophiolitic complex. Episode, 24(4): 245~251.
- Winchester J A, Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chemical Geology, 20: 325~343.

- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 95: 407~419.
- Xue H M, Dong S W, Liou X C. 2001. Geochemical characteristics and genesis of the granitic gneisses from the southeastern Dabie Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 175~183.
- Zheng Y F, Wu Y B, Chen F K, Cong B L, Li L, Zhao Z F. 2004. Zircon U-Pb and oxygen isotope evidence for a large scale ^{18}O depletion event in igneous rocks during the Neoproterozoic. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 68: 4145~4163.

Geochemical Characteristics and Genetic Mechanism of Granitic Gneiss in the Depth Interval of 3000~3500 m from Chinese Continental Scientific Drilling Project

ZHOU Kaifu, LIU Fulai, XU Zhiqin, LI Tianfu, YANG Jingsui, XUE Huaimin, YE Jianguo

Key Laboratory for Continental Dynamics of the Ministry of Land and Resources. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Science, Beijing, 100037

Abstract

The main drill hole CCSD-MH, Chinese Continental Scientific Drilling Project (CCSD), with depth of 5000 m, is located in the Donghai area, southwestern Sulu terrane. The 3000~3500 m recovered cores in CCSD-MH are mainly comprised of orthogneiss (granitic gneiss) and paragneiss, with thin layers of eclogite, chist and amphibolite. The orthogneiss can be subdivided into two groups: K-feldspar granitic gneiss and monzonitic granitic gneiss. The SiO_2 and Al_2O_3 contents of analyzed granitic gneiss samples range from 73.56% to 79.01%, and from 10.49% to 13.75%, respectively. All the analysis show lower abundance of TiO_2 , Fe_2O_3 , FeO , MnO and MgO ; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.26\% \sim 2.56\%$, $\text{FeO} = 0.09\% \sim 1.13\%$ and $\text{MgO} = 0.01\% \sim 0.63\%$. The analyzed orthogneiss samples are richer in Na_2O and K_2O contents, but poor in CaO content, with vary intervals of $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 6.20\% \sim 9.15\%$, $\text{K}_2\text{O} = 1.26\% \sim 5.67\%$ and $\text{CaO} = 0.08\% \sim 1.59\%$. In the MORB normalized spider diagram, the granitic gneiss is relatively riched in K, Rb, Th, Zr and Hf, but evident depleted in Ti, Ta and Nb. The major and trace element compositions indicate that the preexisting rock of granitic gneiss belong to A-type granite protolith, formed in the continental rift surrounding related to Neoproterozoic Rodinia supercontinent breakup event.

Key words: granitic gneiss; geochemistry; genetic mechanism; Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project
