

辽西台里地区新太古代片麻岩杂岩的形成时代、岩石成因和地质意义

蔡丽斌, 金巍, 郑培玺, 张家辉, 李斌, 王庆龙

(吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061)

摘要: 辽西台里地区片麻岩杂岩主要由片麻状花岗岩、黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩组成。锆石 U-Pb 定年结果表明, 该套杂岩形成于 2 510~2 559 Ma, 与“绥中花岗岩”时代相同, 同属华北克拉通新太古代结晶岩石。野外产状和岩石组构特征显示, 本区片麻岩杂岩为一套同变形的深熔型混合岩。其中, 角闪斜长片麻岩代表低度熔融的“古成体”, 其间分布少量具“浅色体”特征的长英质岩脉; 黑云斜长片麻岩为熔融程度较低的“残留体”; 片麻状花岗岩为部分熔融程度最高的“新成体”。它们在矿物组成和地球化学上呈现良好的递变关系。结合前人 Hf 同位素研究资料, 本文认为台里地区片麻岩杂岩可能记录了一期重要的陆壳再造事件。

关键词: 片麻岩杂岩; 深熔作用; 混合岩; 陆壳再造; 新太古代; 台里地区

中图分类号: P588.34⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)02-0226-17

Geochronology, petrogenesis and geological significance of the Neoproterozoic gneiss complex in Taili area of western Liaoning Province

CAI Li-bin, JIN Wei, ZHENG Pei-xi, ZHANG Jia-hui, LI Bin and WANG Qing-long

(College of Earth Science, Jilin University, Changchun 130061, China)

Abstract: The Taili gneiss complex is exposed in the western Liaoning Province and mainly composed of gneissic granites, biotite plagioclase gneisses and hornblende plagioclase gneisses. Zircon U-Pb dating of these rocks indicates that the gneiss complex was formed in the late Neoproterozoic (2 510~2 559 Ma), with ages similar to those of the “Suizhong granite”. This suggests that the Taili gneiss complex is an important part of Archean basement of the North China Craton. Field occurrences and rock textures suggest that the gneiss complex is a suite of migmatites derived from syn-deformational anatexis, of which the hornblende plagioclase gneiss represents the “palaeosome”, which was generated by a very low degree of partial melting with a few felsic veins inside. The felsic veins show the general characteristics of “leucosome”. The biotite plagioclase gneiss represents the “residuum” after the low degree of partial melting, whereas the gneissic granite is the “neosome” characterized by the highest degree of melting. These rocks display a good gradational relationship in mineral content and geochemistry. In combination with previous zircon Hf isotopic data, the authors have reached the conclusion that the Taili gneiss complex originated from the anatexis of Mesoproterozoic ancient crust 2.8~3.0 Ga in age and recorded an important regional magmatic event of crustal reworking.

Key words: gneiss complex; anatexis; migmatite; crustal reworking; Neoproterozoic; Taili area

收稿日期: 2013-12-18; 修订日期: 2014-02-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41172170, 41230206)

作者简介: 蔡丽斌(1989-), 女, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: clb1989@126.com; 通讯作者: 金巍(1956-), 男, 教授, 从事变质岩石学研究, E-mail: jinwei@jlu.edu.cn

辽西台里地区位于辽宁省绥中市东 35 km 海滨(图 1),大地构造位置处于华北克拉通东北缘。该区广泛出露太古宙混合花岗岩、片麻岩,古生代沉积岩和中生代各类花岗岩-火山岩,是研究华北克拉通前寒武纪结晶基底性质及后期地质演化的良好“窗口”(贺同兴等,1992)。早期的研究工作将本区结晶岩系划归为太古宙混合花岗岩(绥中花岗岩)和新太古代建平群大营子组层状变质岩系(辽宁省地质矿产局,1989),共同构成冀东-辽西前寒武纪结晶基底。其中,新太古代建平群大营子组变质岩系多以包体

或残留体形式产出于太古宙混合花岗岩中(图 1)。新近的岩石学及同位素年代学研究表明,台里地区结晶岩石组成复杂,除太古宙片麻岩、花岗岩外,尚有较多中生代花岗岩产出(郑培玺等,2009;李健,2009)。根据产状关系和年代学研究结果,可分为新太古代(~2.5 Ga)片麻岩杂岩、晚三叠世(~220 Ma)斑状花岗闪长质片麻岩、晚侏罗世(~150 Ma)黑云二长花岗岩和黑云二长糜棱岩等 3 个构造-岩浆事件序次(郑培玺等,2009;李健,2009)。

本区已有的研究多集中在花岗质岩石的鉴别及

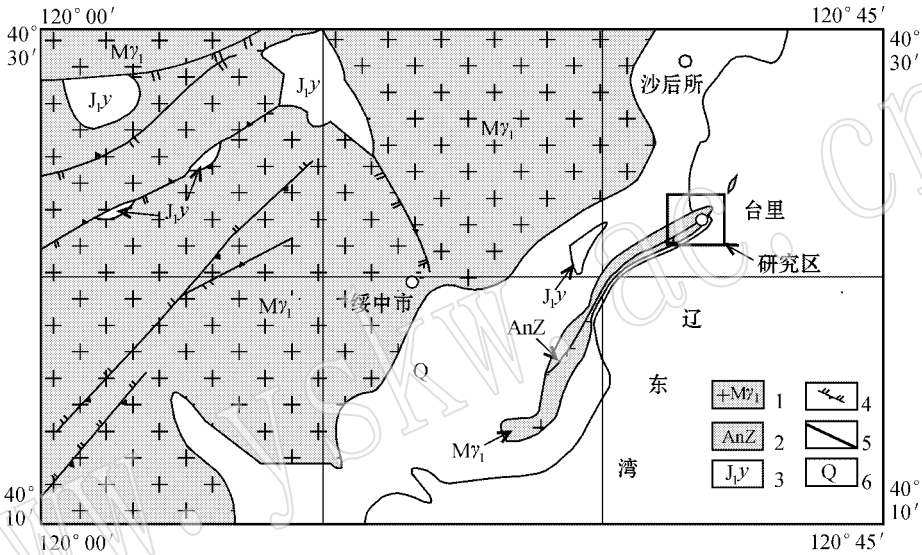


图 1 辽西绥中-兴城区域地质简图[据辽宁省调队(1983)简化修编]

Fig. 1 Simplified geological map of Suizhong-Xingcheng area in western Liaoning Province (simplified after Regional Surveying Party of Liaoning, 1983)

- 1—太古宙花岗质岩石(绥中花岗岩); 2—新太古代变质岩系(建平群); 3—中生代火山岩; 4—断裂构造; 5—地质界线; 6—第四系
- 1—Archean granitic rocks(Suizhong granite); 2—Neoproterozoic metamorphic rocks(Jianping Group); 3—Mesozoic volcanic rocks;
- 4—fault structure; 5—geological boundary; 6—Quaternary

同位素测年工作,侧重于区内构造-岩浆事件格架的建立,而对于新太古代岩石组成和成因关系研究相对薄弱,尤其是对区内各类新太古代片麻岩与花岗岩的产状、成因关系等方面的认识仍不清晰。本文通过对新太古代岩石的大比例尺(1:100)岩性填图,确定台里片麻岩杂岩的组成包括片麻状花岗岩、黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩等主要类型,针对各类岩石的地质产状关系、岩性特征研究,结合片麻岩类的岩石地球化学和同位素年代学工作,系统地揭示了台里片麻岩杂岩的基本地质特征和可能的成因关系,为探讨辽西地区太古宙地壳的成因演化研究

提供了系统的岩石学证据。

1 研究区岩石分布情况

台里地区出露有大面积的新太古代-中生代花岗质岩石,岩石构造变形较为复杂,但产状关系清晰。其中,新太古代片麻状花岗岩分布于台里地区中-北部,以巨型捕虏体形式产出于晚侏罗世黑云二长花岗岩中;新太古代黑云斜长片麻岩与角闪斜长片麻岩以包体形式分布于片麻状花岗岩中;晚三叠世斑状花岗闪长质片麻岩呈近北东向的脉状或条带

① 辽宁省地质局区域地质调查队, 1983. 中华人民共和国 1:20 万区域地质调查报告(锦西幅、兴城幅)。

状产出,明显切割新太古代片麻状花岗岩,晚侏罗世黑云二长花岗岩分布于台里北部及南部,走向近东西,穿切新太古代片麻岩杂岩,其中见有新太古代片

麻岩、花岗岩的捕掳体。另外,该区发育北西走向的基性岩脉,切穿上述所有地质体(图2)。

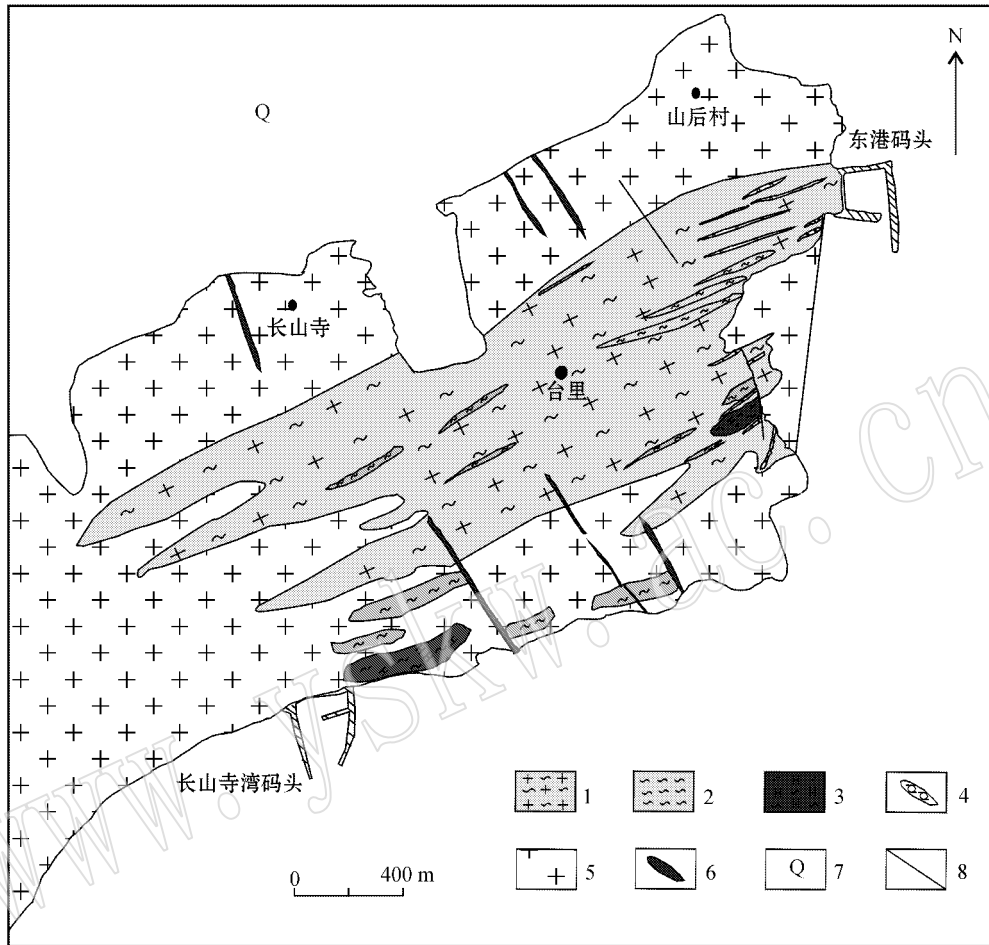


图 2 辽西台里地区岩性分布图

Fig. 2 Lithologic distribution in Taili area of western Liaoning Province

1—新太古代片麻状花岗岩;2—新太古代黑云斜长片麻岩;3—新太古代角闪斜长片麻岩;4—晚三叠世斑状花岗闪长质片麻岩;
5—晚侏罗世黑云二长花岗岩;6—基性岩脉;7—第四系;8—断裂

1—Neoarchean gneissic granite;2—Neoarchean biotite plagioclase gneiss;3—Neoarchean hornblende plagioclase gneiss;4—Late Triassic porphyritic granodioritic gneiss;5—Late Jurassic biotite monzonitic granite;6—mafic dikes;7—Quaternary;8—fault

2 新太古代片麻岩杂岩的岩石学特征

2.1 野外产状特征

台里地区新太古代片麻岩杂岩具有混合岩的一般外貌特征。各类岩石以相互包裹、渐变过渡的形式产出,同时构造变形作用明显,片麻杂岩中片麻状、条带状构造及 S-C 组构发育。该套杂岩主要由片麻状花岗岩、黑云斜长片麻岩和角闪斜长片麻岩组成。其中,片麻状花岗岩为该套杂岩的主体岩性,

多呈灰白色,具有似斑状结构,片麻状构造。该类岩石具有变化的中细粒-中粗粒结构,出现暗色矿物和浅色矿物相对含量的变化(图 3a)。其间分布有少量中粗粒-伟晶质的长英质岩脉,呈无根脉状、囊状分布。局部也可见到长英质岩脉侵入片麻状花岗岩(图 3c)穿切其片麻理的现象。黑云斜长片麻岩为灰黑色,中细粒结构,通常以规模较小的残留体分散在片麻状花岗岩中,具有不规则团块状、条带状、似层状、透镜状等多种形态。由片麻岩(残留体)至花岗岩,浅色矿物(长石、石英)增多,暗色矿物逐渐减少,

矿物粒度逐渐增大, 呈现良好的组分-组构递变关系(图 3b)。角闪斜长片麻岩是片麻岩杂岩中颜色最暗的部分, 为细粒结构, 独立分布或以包体形式分布于片麻状花岗岩中, 包体与围岩间具有截然的接触边

界(图 3c)。角闪斜长片麻岩中可见长英质岩脉发育, 岩脉产出规模不一, 小至几毫米, 大到十几米, 主要呈透镜状、顶厚褶皱状、褶曲状, 条带状等构造形式(图 3d、3e、3f)。

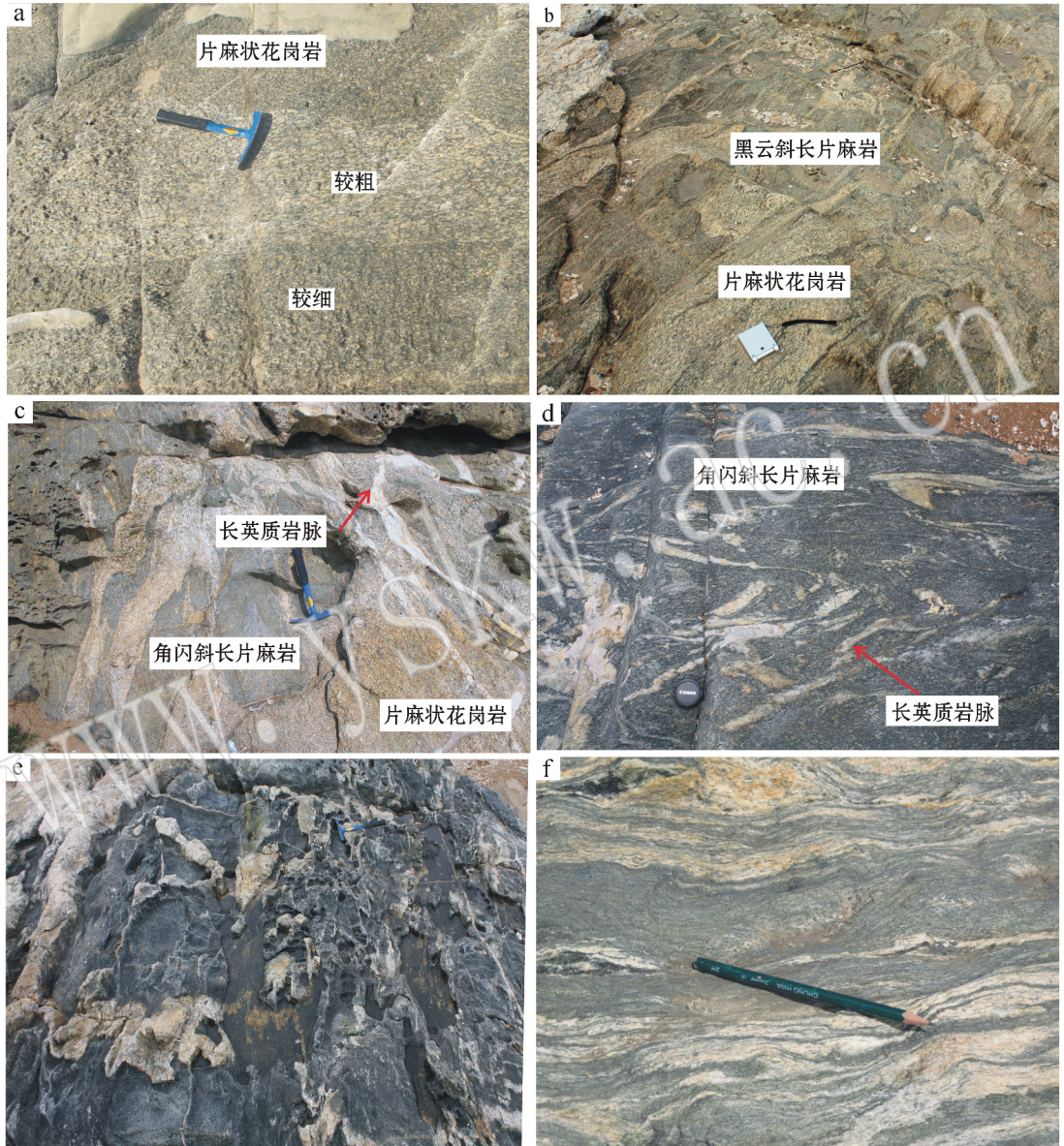


图 3 辽西台里地区片麻岩杂岩的野外地质特征

Fig. 3 Field geological characteristics of the gneiss complex from Taili area of western Liaoning Province

a—片麻状花岗岩; b—片麻状花岗岩与黑云斜长片麻岩; c—片麻状花岗岩中的角闪斜长片麻岩包体与长英质岩脉; d—长英质岩脉呈褶皱状分布于角闪斜长片麻岩中; e—长英质岩脉以顶厚褶皱状分布于角闪斜长片麻岩中; f—长英质岩脉与角闪斜长片麻岩呈条带状分布
a—gneissic granite; b—gneissic granite and biotite plagioclase gneiss; c—hornblende plagioclase gneiss and felsic veins distributed in the gneissic granite; d—folded felsic veins within the hornblende plagioclase gneiss; e—felsic veins showing the feature of top-thick fold, distributed in the hornblende plagioclase gneiss; f—felsic veins and hornblende plagioclase gneisses assuming banded distribution

2.2 显微结构特征

2.2.1 片麻状花岗岩

片麻状花岗岩的主要矿物为石英(20% ~

35%)、斜长石(15% ~ 35%)、微斜长石(25% ~ 40%)、黑云母(5% ~ 12%), 含有少量绿帘石、黝帘石、榍石、磷灰石、磁铁矿等副矿物(图4a)。根据其

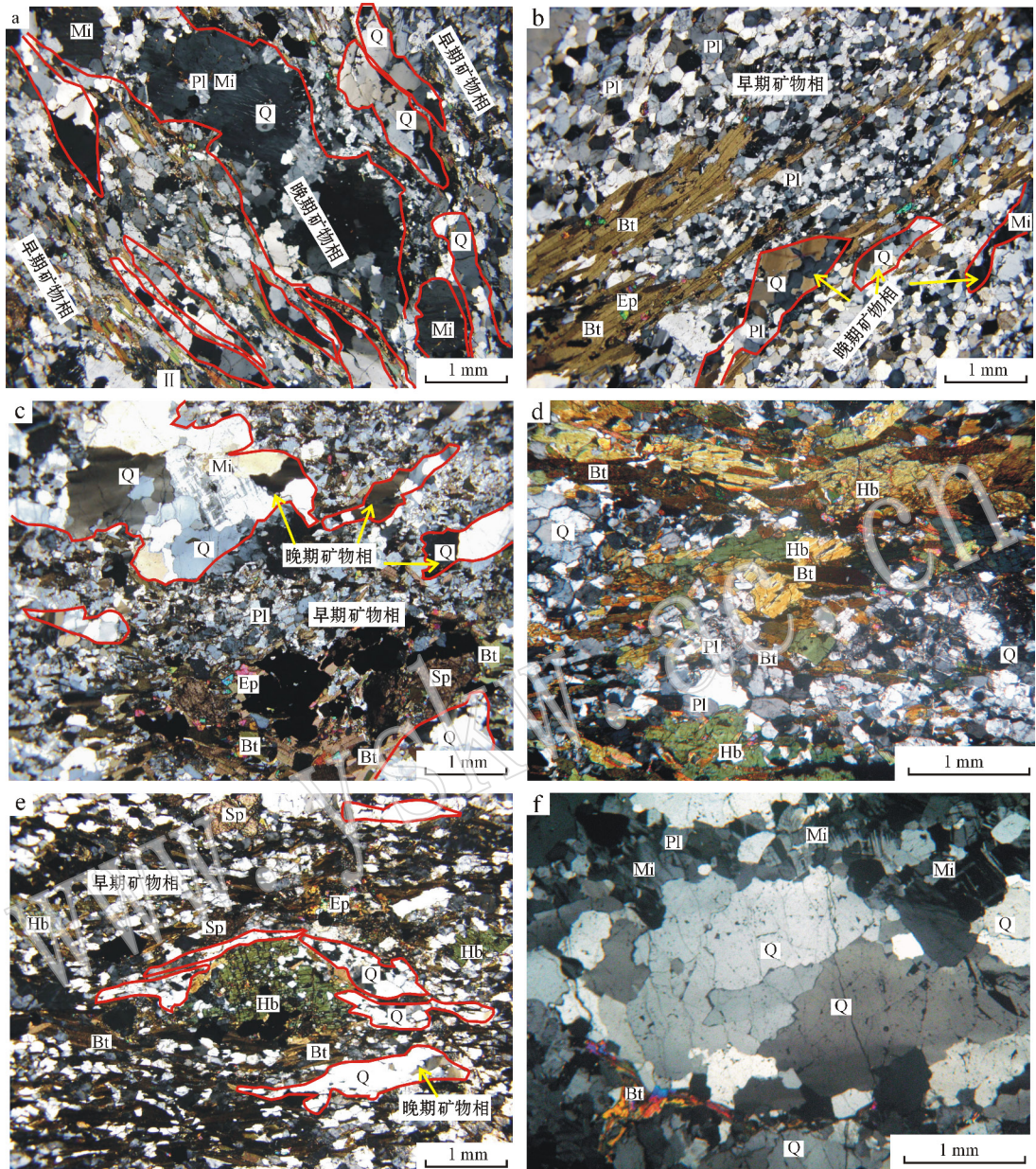


图 4 辽西台里地区片麻岩杂岩的显微结构特征

Fig. 4 Microstructure characteristics of the gneiss complex from Taili area of western Liaoning Province

a—片麻状花岗岩；b~c—黑云斜长片麻岩；d~e—角闪斜长片麻岩；f—长英质岩脉；图中矿物缩写参照沈其韩(2009)

a—gneissic granite；b~c—biotite plagioclase gneiss；d~e—hornblende plagioclase gneiss；f—felsic vein；mineral abbreviations after Shen Qihan (2009)

矿物与组构特征,可明显区分出早、晚两个世代的矿物相。早期为细粒(0.2~0.5 mm)鳞片粒状变晶结构的斜长石+石英+黑云母+副矿物组合。该类组合在片麻状花岗岩中所占数量较小,一般在25%~35%左右,且分布不均匀。组合中斜长石与石英均为它形粒状,呈良好的三边镶嵌结构,发生亚颗粒化或定向拉长;黑云母呈它形片状,定向排列。该矿物相中出现一些交代现象,如斜长石的交代反条纹、

“糟化”、暗化与微斜长石化等。

晚期矿物相为中粒(1~4 mm)粒状结构的石英+微斜长石+斜长石(少量),该矿物组合构成片麻状花岗岩的主体,约占岩石的65%~75%。其中,石英呈聚合体分布,微斜长石具有两种形式,一种以斑晶形式存在,斑晶中常见具有交代净边结构的长石、石英等早期残留颗粒,其边缘分布的细粒斜长石普遍出现蠕虫结构,显示熔融交代特征;另一种自形程

度较高,常与斜长石呈三边结构接触,其与石英聚合体均显示出熔体结晶的特点。晚期矿物组合常呈斑状、团块状或条带状散布于早期细粒矿物组合中,出现拉长、构造拖尾、旋转的现象(图4a)。

2.2.2 黑云斜长片麻岩

黑云斜长片麻岩的主要组成矿物有:石英(20%~25%)、斜长石(30%~40%)、微斜长石(20%~25%)、黑云母(12%~20%),部分可见角闪石(0~12%)。副矿物主要为绿帘石、榍石、磷灰石和磁铁矿。

黑云斜长片麻岩的早期矿物相成分介于片麻状花岗岩和角闪斜长片麻岩之间,为斜长石+石英+角闪石(少量)+黑云母+副矿物。该类岩石两期矿物相的组构特征与片麻状花岗岩十分相似(图4b),显著的区别是:黑云斜长片麻岩的早期矿物相含量较高(约65%),出现少量与角闪斜长片麻岩特征相似的角闪石残斑或碎斑;晚期矿物相含量较低(35%),并以石英聚合体为主,微斜长石斑晶分布较少(图4b、4c)。

2.2.3 角闪斜长片麻岩

角闪斜长片麻岩主要由角闪石(15%~40%)、黑云母(10%~15%)、石英(10%~15%)、斜长石(20%~35%)、微斜长石(10%~15%)组成,榍石、绿帘石、磷灰石和磁铁矿等副矿物含量较高。

角闪斜长片麻岩中早期矿物相含量(85%~90%)极高,该矿物相的组构特征与片麻状花岗岩和黑云斜长片麻岩相似,如具有细粒鳞片粒状变晶结构、长英质矿物的三边镶嵌结构等。而不同的是,角闪斜长片麻岩的早期矿物相主要由斜长石+石英+角闪石+黑云母+副矿物组成。出现较多的角闪石残斑或残块,具有熔融残余特点,部分退变形成黑云母(图4d、4e)。斜长石的交代现象少见。其晚期矿物相很少发育,主要为石英聚合体,少见微斜长石交代斑晶。该类岩石的晚期矿物也出现拉长、构造拖尾、旋转的现象(图4e)。

2.2.4 长英质岩脉

长英质岩脉主要由石英(35%~40%)、斜长石(30%)、微斜长石(25%)及少量黑云母(2%~8%)组成,副矿物含量极低。

该类岩石粒度多在1~4 mm之间,基本由晚期矿物相(85%~95%)组成。该相矿物组成与杂岩中其他3类岩石的晚期矿物相一致,主要由石英聚合体和微斜长石、斜长石组成,指示其为部分熔融熔体结晶的产物。其中可见少量早期矿物残留,主要为

细粒石英、长石及具蚀变特征的黑云母,副矿物含量极低(图4f)。

本区片麻岩杂岩中各类岩石均出现部分熔融的产物,如早期矿物相中斜长石的反条纹结构和“糟化”、暗化等现象,角闪石的熔融残余结构等;晚期矿物相的微斜长石交代斑晶和石英聚合体等。这些特征可与阜平岩群中的深熔岩石(程裕淇等,2001)相类比,指示该杂岩为一套深熔型混合岩。其早期矿物相基本保留熔融前的原岩矿物组合,为部分熔融作用不完全改造原有矿物而成;晚期矿物相为熔体直接结晶或完全交代早期矿物形成,为深熔过程中形成的矿物组合。这两期矿物相在杂岩各组成部分中所占比例不同,可以指示各类岩石部分熔融程度的差异和演化趋势,即从角闪斜长片麻岩-黑云斜长片麻岩-片麻状花岗岩,显示熔融程度逐渐增加的趋势。

3 新太古代片麻岩杂岩的年代学

3.1 样品的选择与分析方法

近年来台里地区太古宙岩石的定年主要集中在片麻状花岗岩类中,已有较好的数据积累(郑培玺等,2009;李健,2009)。为限定本区片麻岩杂岩的形成时代并进一步研究其成因,本文在研究区南部采集了黑云斜长片麻岩和角闪斜长片麻岩样品,进行锆石U-Pb同位素年龄测试。这两类岩石的采样点地理坐标分别为N40°21'38",E120°34'40"和N40°20'57",E120°34'29"。

岩石样品由河北省区域地质矿产调查研究所实验室破碎、单矿物分离。锆石的制靶、显微镜照相、阴极发光(CL)图像分析在中国科学院地质与地球物理研究所完成,锆石U、Th、Pb的测定在中国科学院地质与地球物理研究所CAMECA IMS-1280二次离子质谱仪(SIMS)上进行。锆石标样与锆石样品以1:3比例交替测定。U-Th-Pb同位素比值用标准锆石Plésovice(337 Ma)校正获得,U含量采用标准锆石91500(81×10^{-6} , Wiedenbeck *et al.*, 1995)校正获得,并以标准样品清湖锆石(李献华等,2012)作为未知样监测数据的精确度。普通Pb校正采用实测 ^{204}Pb 值。以现代地壳的平均Pb同位素组成(Stacey and Kramers, 1975)作为普通Pb组成进行校正。单点分析的同位素比值及年龄误差均为 1σ ,加权平均年龄误差为95%置信度。分析结果见表1。

表 1 锆石 SIMS U-Pb 同位素测定结果
Table 1 Analytical results of U-Pb isotopic dating for the single-grain zircon

测试点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值			同位素年龄/Ma								
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ						
D012-6@1	300	313	1046	0.30	0.1602	0.25	5.0367	1.66	0.2293	1.64	2.448	4	1.826	14	1331	20
D012-6@2	165	154	250	0.62	0.1715	0.40	11.6150	1.56	0.4913	1.50	2.572	7	2.574	15	2576	32
D012-6@3	261	278	451	0.62	0.1685	0.27	10.1114	1.53	0.4356	1.50	2.542	5	2.445	14	2331	29
D012-6@4	315	308	1121	0.28	0.1576	0.31	4.8016	1.54	0.2250	1.50	2.400	6	1.785	13	1308	18
D012-6@5	311	821	910	0.90	0.1574	0.26	5.2582	1.52	0.2430	1.50	2.423	5	1.862	13	1402	19
D012-6@6	295	334	577	0.58	0.1638	0.26	8.7553	1.52	0.3881	1.50	2.494	4	2.313	14	2114	27
D012-6@7	201	175	343	0.51	0.1693	0.36	10.4505	1.55	0.4482	1.50	2.549	6	2.476	14	2387	30
D012-6@8	186	57	403	0.14	0.1653	0.31	8.7254	1.54	0.3832	1.51	2.509	5	2.310	14	2091	27
D012-6@9	359	433	1471	0.29	0.1519	0.29	4.1019	1.53	0.1966	1.50	2.361	5	1.655	13	1157	16
D012-6@11	483	975	4279	0.23	0.1202	0.29	1.5389	1.54	0.0964	1.50	1.893	6	946	10	593	9
D012-6@12	374	1134	2872	0.40	0.1080	0.26	1.5633	1.58	0.1067	1.55	1.735	5	956	10	654	10
D012-6@13	364	352	1089	0.32	0.1625	0.22	5.9610	4.97	0.2675	4.96	2.473	4	1.970	44	1528	68
D012-6@14	299	333	767	0.44	0.1645	0.31	6.8749	1.53	0.3044	1.50	2.495	5	2.095	14	1713	23
D012-6@15	163	163	255	0.64	0.1702	0.33	11.1750	1.54	0.4765	1.50	2.559	6	2.538	15	2512	31
D012-6@16	258	213	614	0.35	0.1647	0.26	7.5815	1.52	0.3352	1.50	2.498	5	2.183	14	1864	24
D012-6@17	244	325	596	0.55	0.1629	0.31	6.9046	1.53	0.3081	1.50	2.483	5	2.099	14	1731	23
D012-6@18	198	79	418	0.19	0.1646	0.30	8.7467	1.53	0.3862	1.50	2.500	5	2.312	14	2105	27
D012-6@19	389	842	1414	0.60	0.1525	0.23	4.3320	1.52	0.2066	1.51	2.370	4	1.700	13	1211	17
D012-6@20	237	178	684	0.26	0.1610	0.39	6.0834	1.59	0.2746	1.54	2.463	7	1.988	14	1564	21
D012-6@21	295	351	739	0.48	0.1635	0.25	6.9490	1.52	0.3090	1.50	2.488	4	2.105	17	1736	23
D012-6@22	197	117	338	0.35	0.1673	0.39	10.6134	1.55	0.4604	1.50	2.530	7	2.490	15	2441	31
D012-6@23	288	444	953	0.47	0.1600	0.32	5.1792	1.55	0.2358	1.51	2.449	6	1.849	13	1365	19
D012-6@24	326	322	541	0.60	0.1692	0.40	10.5420	1.56	0.4528	1.50	2.546	7	2.484	15	2408	30
D012-6@25	334	344	572	0.60	0.1695	0.23	10.1831	1.52	0.4360	1.50	2.552	4	2.452	14	2333	30
D012-6@26	327	131	1570	0.08	0.1482	0.24	3.5367	1.53	0.1736	1.51	2.320	4	1.536	12	1032	14
D012-6@27	317	530	901	0.59	0.1639	0.42	5.9069	5.49	0.2627	5.47	2.488	7	1.962	49	1504	74

续表 1
Continued Table 1

测试点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值			同位素年龄/Ma								
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ						
D012-6@28	298	290	476	0.61	0.1710	0.29	11.0008	1.53	0.4674	1.50	2.565	5	2.523	14	2.472	31
D012-6@29	290	187	1940	0.10	0.1289	0.73	2.2523	2.40	0.1275	2.28	2.073	13	1.198	17	774	17
D012-6@30	136	29	305	0.09	0.1657	0.61	8.5513	1.64	0.3767	1.52	2.504	11	2.291	15	2.061	27
D012-6@31	264	216	528	0.41	0.1660	0.26	8.9713	1.52	0.3924	1.50	2.516	4	2.335	14	2.134	27
D014-1@1	197	86	365	0.24	0.1638	0.33	9.8861	1.50	0.4383	1.50	2.493	6	2.424	14	2.343	30
D014-1@2	155	265	215	1.23	0.1652	0.38	10.8196	1.55	0.4755	1.50	2.500	6	2.508	15	2.508	31
D014-1@3	160	259	235	1.10	0.1663	0.38	10.5353	1.55	0.4599	1.50	2.503	6	2.483	15	2.439	31
D014-1@4	212	382	307	1.25	0.1658	0.31	10.3661	1.53	0.4538	1.50	2.515	5	2.468	14	2.412	30
D014-1@5	270	499	374	1.34	0.1661	0.27	10.6940	1.53	0.4673	1.50	2.515	5	2.497	14	2.472	31
D014-1@6	204	370	284	1.31	0.1656	0.41	10.6861	1.56	0.4684	1.50	2.518	7	2.496	15	2.477	31
D014-1@7	103	146	163	0.89	0.1651	0.43	10.0998	1.57	0.4441	1.51	2.507	7	2.444	15	2.369	30
D014-1@8	168	264	249	1.06	0.1654	0.34	10.5331	1.54	0.4624	1.50	2.510	6	2.483	14	2.450	31
D014-1@9	238	345	366	0.94	0.1652	0.32	10.3216	1.54	0.4537	1.50	2.508	6	2.464	14	2.412	30
D014-1@10	231	193	399	0.48	0.1648	0.30	10.0921	1.53	0.4449	1.50	2.502	5	2.443	14	2.373	30
D014-1@11	163	271	247	1.10	0.1652	0.56	10.1706	1.61	0.4471	1.50	2.507	10	2.450	15	2.383	30
D014-1@12	170	247	253	0.98	0.1653	0.33	10.6125	1.54	0.4660	1.50	2.509	6	2.490	14	2.466	31
D014-1@13	340	299	583	0.51	0.1646	0.31	10.0890	1.53	0.4448	1.50	2.502	5	2.443	14	2.372	30
D014-1@14	200	344	282	1.22	0.1643	0.32	10.6737	1.54	0.4714	1.50	2.500	5	2.495	14	2.490	31
D014-1@15	146	188	228	0.82	0.1652	0.38	10.4625	1.55	0.4602	1.50	2.507	6	2.477	15	2.440	31
D014-1@16	303	611	404	1.52	0.1663	0.34	10.8579	1.54	0.4736	1.50	2.521	6	2.511	14	2.499	31
D014-1@17	278	577	346	1.67	0.1653	0.29	11.2016	1.53	0.4917	1.50	2.510	5	2.540	14	2.578	32
D014-1@18	121	221	201	1.10	0.1637	0.44	9.2473	1.57	0.4105	1.50	2.491	8	2.363	15	2.217	28
D014-1@19	332	701	439	1.60	0.1651	0.39	10.6622	1.55	0.4685	1.50	2.508	7	2.494	15	2.477	31
D014-1@20	327	750	407	1.84	0.1651	0.26	10.9053	1.53	0.4792	1.50	2.508	4	2.515	14	2.524	32
D014-1@21	284	576	384	1.50	0.1660	0.28	10.7036	1.58	0.4677	1.55	2.518	5	2.498	15	2.473	32
D014-1@22	182	98	351	0.28	0.1653	0.34	9.4800	1.54	0.4164	1.50	2.509	6	2.386	14	2.244	29
D014-1@23	301	646	391	1.65	0.1658	0.32	10.8115	1.54	0.4731	1.50	2.515	5	2.507	14	2.497	31

3.2 样品锆石特征和 U-Pb 同位素测试结果

3.2.1 黑云斜长片麻岩 (D014-1)

CL 图像显示, 锆石为半自形-自形短柱状, 部分为长柱状或粒状, 长宽比为 2~4, 长径在 100~200 μm 之间。锆石晶型保存良好, 内部结构较清晰, 发育弱振荡环带, 部分具有核幔结构、无分带-弱分带结构(图 5a)。样品共进行了 23 个点的测定, 其 U、Th 含量分别为 $163 \times 10^{-6} \sim 583 \times 10^{-6}$ 和 $86 \times 10^{-6} \sim 750 \times 10^{-6}$, Th/U 均 >0.1 。大部分锆石点 Th/U ≥ 1 (0.82~1.84), 指示其为岩浆锆石(吴元保等, 2004)。在锆石 U-Pb 谐和图中, 分析点较为集中, 均落在谐和线上及其附近(图 6a), 得出的不一致线上交点

$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2513 \pm 3 \text{ Ma}$, MSWD = 3。靠近谐和线上的 13 个数据点加权平均 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2512 \pm 4 \text{ Ma}$ (MSWD = 1.18), 与不一致线上交点的年龄一致, 代表黑云斜长片麻岩的岩浆结晶年龄。

3.2.2 角闪斜长片麻岩 (D012-6)

CL 图像显示, 样品中锆石为半自形-自形长柱状, 长宽比约 1.5~2.5, 长径在 80~150 μm 之间。锆石较自形, 具有环带结构, 并发育核幔结构、无分带结构及面型分带结构等(图 5b), 少数锆石出现蜕晶化现象, 说明锆石经历了变质热事件的改造。本文对样品中 31 颗锆石进行了 U-Th-Pb 测定, 结果表明其 U、Th 含量分别为 $250 \times 10^{-6} \sim 4279 \times 10^{-6}$ 、



图 5 辽西台里地区黑云斜长片麻岩 (a) 与角闪斜长片麻岩 (b) 中锆石的 CL 图像

Fig. 5 CL images of zircons from biotite plagioclase gneiss (a) and hornblende plagioclase gneiss (b) in Taili area of western Liaoning Province

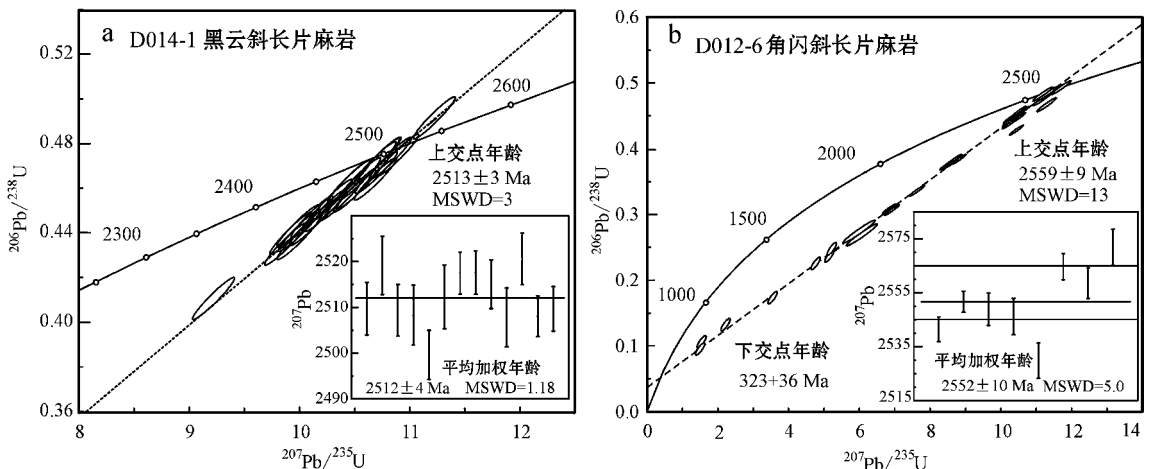


图 6 辽西台里地区黑云斜长片麻岩 (a) 和角闪斜长片麻岩 (b) 的锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 Zircon U-Pb concordia diagrams of a biotite plagioclase gneiss sample (a) and a hornblende plagioclase gneiss sample (b) from Taili area of western Liaoning

$29 \times 10^{-6} \sim 1134 \times 10^{-6}$, Th/U 比值 ≥ 0.1 , 表明其仍保留岩浆锆石的特点。其中大部分锆石 Th/U 比值在 0.23~0.90 之间, 平均为 0.57。在锆石 U-Pb 谐和图中, 大部分数据点偏离谐和线, 但构成了较好的不一致线, 上交点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2559 \pm 9 \text{ Ma}$, MSWD = 13 (图 6b)。靠近谐和线的 8 个数据点加权平均 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2552 \pm 10 \text{ Ma}$, MSWD = 5.0, 与不一致线上交点的年龄一致, 代表角闪斜长片麻岩岩浆结晶年龄。

资料显示, 台里地区片麻状花岗岩的成岩年龄为 $2527 \pm 13 \text{ Ma}$ (郑培玺等, 2009; 李健, 2009), 结合本文锆石定年结果表明, 本区片麻岩杂岩中各类岩石的年龄数据主要集中在 2.50~2.57 Ga 之间, 为新太古代末期的构造热事件产物。

4 新太古代片麻岩杂岩的地球化学特征

本文系统采集片麻状花岗岩、黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩、长英质岩脉样品, 进行主微量测试分析, 以讨论本区新太古代片麻岩杂岩的地球化学特征及其成因关系。

岩石样品由河北省区域地质矿产调查研究所实验室破碎、缩分。分析测试在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成。主量元素用 XRF 分析完成, 所用仪器为日本理学 Rigaku100e 型 X 荧光光谱仪, 分析误差优于 2%; 微

量元素用 ICP MS 分析完成, 所用仪器为 Finnigan MAT 公司 ELEMENT 型高分辨等离子体质谱仪, 微量元素分析精度优于 3%。并以标准样品 GSR-1 花岗岩作为未知样监测数据的精确度。分析数据见表 2、表 3。

4.1 主量元素

新太古代片麻岩杂岩整体的 SiO_2 含量变化范围较大 (54.31%~76.40%), 富钾 ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 基本 ≥ 1), 全碱含量介于 6.64%~8.90%, 铝饱和指数 A/CNK 为 0.85~1.26, 属准铝质-过铝质岩石 (图 7a), 大部分为准铝质。其中:

片麻状花岗岩具有较高的 SiO_2 (66.32%~74.22%) 含量, 低的 MgO (0.52%~1.27%) 和 Fe_2O_3 (1.90%~4.65%) 和 CaO (1.31%~2.99%) 和 TiO_2 (0.37%~0.74%) 含量。该类岩石的 K_2O (4.12%~4.90%) 和 Na_2O (3.08%~4.26%) 含量较高, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值 > 1 , 在 An-Ab-Or 图上相当于花岗岩 (图 8)。

黑云斜长片麻岩 SiO_2 含量为 59.81%~62.50%, 富 K_2O (4.17%~4.71%) 和 Na_2O (3.58%~4.19%) 和 MgO (1.61%~2.17%) 和 Fe_2O_3 (6.06%~7.02%) 和 CaO (3.49%~3.65%) 和 TiO_2 (0.91%~1.19%)。在 An-Ab-Or 图解中相当于二长花岗岩-花岗岩 (图 8)。

角闪斜长片麻岩 SiO_2 含量为 54.31%~67.70%, 岩石富 Na_2O (3.79%~4.92%) 和 Al_2O_3 (16.57%~18.13%), Fe_2O_3 (3.02%~8.72%) 和 CaO (2.99%

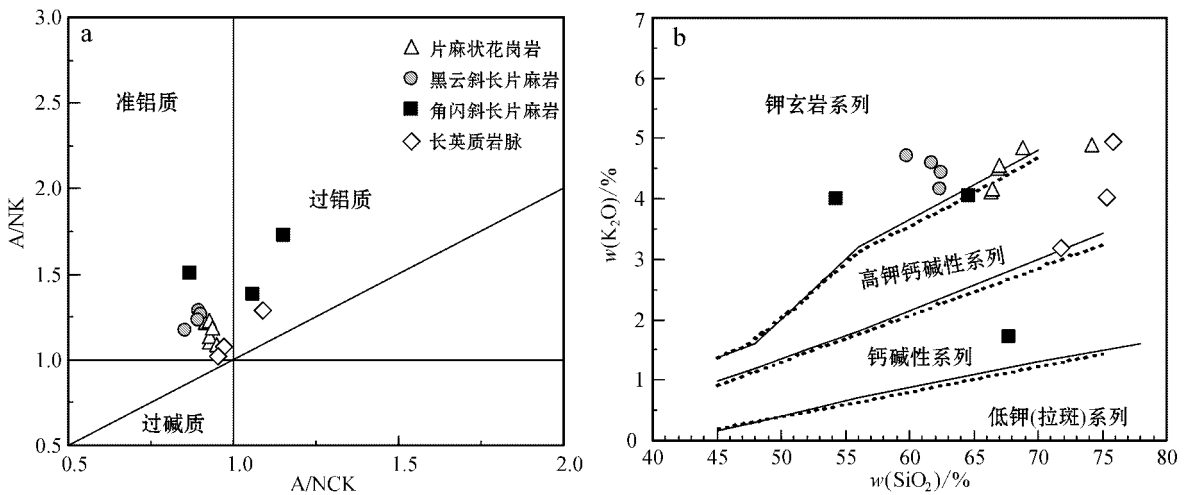


图 7 辽西台里地区片麻岩杂岩 A/NK - A/NCK 分类图解 (a, 据 Maniar and Piccoli, 1989) 和 $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 判别图解 (b, 据 Peccerillo and Taylor, 1976)

Fig. 7 A/NK - A/NCK diagram (a, after Maniar and Piccoli, 1989) and $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ diagram (b, after Peccerillo and Taylor, 1976) for the gneiss complex from Taili area of western Liaoning Province

wtB/%

表2 台里地区片麻岩杂岩主量元素分析结果

Table 2 Analytical results of major elements for the gneiss complex in Taili area

岩性	片麻状花岗岩				黑云斜长片麻岩				角闪斜长片麻岩				长英质岩脉			
	E098	E099	B0519-1R	B0518-1*	B0519-1*	B0519-2-1*	D014-1	D016	A003-6*	B0519-4*	D015-1	D015-2	D012-6	D012-1	D012-5	E095-1
SiO ₂	67.01	74.22	66.49	68.83	66.32	66.89	62.36	61.68	62.50	59.81	64.57	67.70	54.31	76.09	76.32	76.40
TiO ₂	0.74	0.37	0.64	0.48	0.65	0.66	1.06	1.19	0.91	0.97	0.45	0.41	0.69	0.03	0.06	0.06
Al ₂ O ₃	14.58	13.06	14.99	14.61	14.92	14.81	14.80	15.08	15.55	15.53	18.13	16.57	17.40	13.47	13.08	13.02
Fe ₂ O ₃	4.65	1.90	4.26	3.26	4.31	4.42	6.74	6.55	6.06	7.02	3.02	3.59	8.72	1.00	1.09	0.85
MnO	0.07	0.03	0.06	0.05	0.05	0.04	0.09	0.08	0.07	0.08	0.05	0.05	0.15	0.01	0.01	0.01
MgO	1.27	0.52	1.20	0.86	1.23	1.17	1.87	1.79	1.61	2.17	1.06	0.98	3.47	0.22	0.13	0.13
CaO	2.42	1.31	2.98	1.92	2.99	2.17	3.51	3.49	3.65	3.60	2.99	3.54	6.25	1.38	0.94	0.71
Na ₂ O	3.69	3.08	4.18	3.98	4.13	4.26	3.63	3.58	3.84	4.19	4.81	4.92	3.79	4.89	3.52	3.55
K ₂ O	4.53	4.90	4.13	4.85	4.12	4.50	4.17	4.59	4.44	4.71	4.04	1.72	4.00	2.33	4.50	4.95
P ₂ O ₅	0.39	0.09	0.32	0.25	0.32	0.30	0.65	0.59	0.53	0.54	0.14	0.13	0.34	0	0.01	0
L.O.I	0.49	0.40	0.60	0.46	0.65	0.55	0.74	0.64	0.62	1.01	0.58	0.76	0.80	0.47	0.23	0.21
Total	99.84	99.88	99.89	99.55	99.69	99.77	99.62	99.26	99.78	99.63	99.84	100.37	99.92	99.89	99.89	99.89
A/NCK	0.94	0.95	0.92	0.93	0.92	0.93	0.89	0.88	0.91	1.26	1.04	1.13	0.85	1.14	0.97	0.93
A/NK	1.19	1.09	1.21	1.11	1.22	1.14	1.25	1.21	0.87	1.17	1.36	1.70	1.48	1.27	1.07	1.01
Na ₂ O+K ₂ O	8.22	7.98	8.31	8.83	8.25	8.76	7.80	8.17	8.28	8.90	8.85	6.64	7.79	7.22	8.02	8.49
CIPW 标准矿物																
Q	21.64	34.15	19.15	22.21	19.28	19.03	16.08	14.44	14.09	7.92	13.17	23.07	0	37.44	37.31	35.07
An	9.54	5.97	10.04	7.76	10.13	8.08	11.95	11.73	12.22	9.83	14.05	16.82	18.92	6.83	4.59	3.54
Ab	31.54	26.26	35.73	34.05	35.37	36.42	31.19	30.84	32.89	36.10	41.07	41.89	32.53	39.93	29.19	30.11
Or	27.01	29.15	24.65	28.98	24.65	26.87	25.02	27.61	26.56	28.34	24.09	10.23	23.98	13.94	27.14	29.35

样品 B0518-1*、B0519-1*、B0519-2-1*、A003-6* 及 B0519-4* 数据引自李健(2009)。

表 3 台里地区片麻岩杂岩微量元素分析结果
Table 3 Analytical results of trace elements for the gneiss complex in Taiji area

$w_B/10^{-6}$

岩性 样品号	片麻状花岗岩					黑云斜长片麻岩					角闪斜长片麻岩					长英质岩脉				
	E098	E099	B0519-1R	B0518-1*	B0519-1*	B0519-2.1*	D014-1	D016	A003-6*	B0519-4*	D015-1	D015-2	D012-6	D012-1	D012-5	E095-1				
V	59.36	25.38	34.00	51.00	57.30	90.46	89.98	85.50	100.00	40.94	43.16	132.70	8.51	6.21	10.20					
Cr	23.17	10.98	13.00	12.70	15.90	24.45	17.50	28.08	10.10	21.51	22.99	35.99	6.67	5.72	7.89					
Co	8.21	2.81	7.20	7.00	7.38	12.16	9.90	11.61	16.70	5.65	5.55	22.94	0.52	0.81	0.43					
Ni	9.70	5.14	6.79	7.62	8.10	11.52	7.82	14.18	17.50	5.77	5.45	20.31	0.75	1.37	0.24					
Zn	81.89	40.67	61.70	60.70	73.20	90.43	108.30	86.58	116.00	49.91	73.02	116.70	14.53	16.31	12.17					
Ga	20.39	16.62	17.90	18.10	17.90	22.48	22.21	21.97	21.60	19.96	19.57	22.57	14.69	13.03	16.78					
Rb	194.90	168.60	142.00	185.00	143.00	194.30	167.60	170.60	168.00	155.40	100.70	126.90	54.25	122.60	143.90					
Sr	382.50	290.00	486.00	486.00	550.00	500.00	604.70	687.30	663.00	513.90	530.20	491.10	325.10	254.70	207.00					
Y	41.20	27.69	33.70	27.70	20.60	32.56	38.65	28.42	35.10	16.48	21.68	21.53	0.79	2.92	3.20					
Zr	256.10	236.20	308.00	306.00	326.00	260.50	382.90	398.90	372.00	273.70	172.90	162.10	34.43	52.77	35.36					
Nb	28.39	15.26	17.70	17.20	15.50	29.37	29.71	30.92	23.40	9.80	12.43	6.37	0.97	1.40	4.53					
Cs	2.40	1.47	2.12	2.42	2.13	3.40	2.64	4.24	3.44	1.82	1.39	1.72	0.23	0.51	1.03					
Ba	934.70	840.70	1177.00	1242.00	1279.00	1056.70	1568.40	1677.00	1103.00	1572.00	585.10	350.30	260.90	1133.20	225.30					
La	70.77	182.60	64.70	68.40	79.00	85.28	114.60	88.97	68.20	32.31	31.17	29.04	2.07	20.20	21.00					
Ce	178.70	279.50	137.00	142.00	146.00	192.90	244.50	191.50	151.00	67.06	63.93	62.38	3.73	39.21	41.16					
Pr	24.15	27.02	15.00	16.30	16.80	24.12	29.88	20.59	18.10	8.23	7.72	7.80	0.40	4.66	4.42					
Nd	87.12	79.9	58.30	62.70	60.70	85.25	106.80	75.80	74.50	30.77	29.44	32.06	1.44	15.51	12.19					
Sm	14.08	10.51	9.45	10.40	9.97	13.16	16.24	10.97	12.80	5.00	5.61	6.16	0.27	2.30	1.34					
Eu	1.10	1.33	1.83	1.54	1.89	2.48	2.90	2.38	2.35	1.49	1.50	1.60	0.27	0.44	0.23					
Gd	9.45	6.42	7.26	8.22	7.93	8.76	10.77	8.61	9.78	3.65	4.55	5.16	0.20	1.21	0.62					
Tb	1.44	1.03	0.95	1.12	1.03	1.23	1.53	0.94	1.25	0.54	0.70	0.76	0.03	0.16	0.09					
Dy	7.85	5.50	4.86	6.03	5.54	6.44	7.91	4.79	6.22	2.99	4.14	4.22	0.15	0.74	0.49					
Ho	1.55	1.06	0.96	1.14	1.01	1.24	1.55	0.85	1.19	0.61	0.81	0.84	0.03	0.13	0.11					
Er	4.00	2.72	2.75	3.28	2.88	3.17	3.87	2.36	3.39	1.67	2.22	2.29	0.08	0.29	0.33					
Tm	0.59	0.39	0.41	0.50	0.40	0.47	0.55	0.34	0.49	0.25	0.33	0.34	0.01	0.04	0.06					
Yb	3.77	2.31	2.28	3.04	2.55	3.09	3.63	2.23	2.73	1.73	2.22	2.22	0.11	0.28	0.52					
Lu	0.55	0.32	0.34	0.44	0.35	0.50	0.53	0.33	0.39	0.28	0.33	0.34	0.03	0.05	0.10					
Hf	6.31	5.96	6.77	7.24	7.57	6.15	8.68	8.11	7.95	6.09	4.42	3.91	1.28	1.73	1.68					
Ta	2.40	1.47	0.93	2.43	1.12	2.08	1.99	2.03	1.08	1.09	1.47	0.46	0.08	0.13	0.951					
Pb	25.25	30.21	18.60	27.40	21.40	21.86	24.10	22.59	22.50	28.55	22.29	23.43	16.06	26.32	22.51					
Th	12.71	26.89	10.70	14.10	12.70	19.60	8.42	10.19	8.27	12.02	12.70	6.44	8.58	9.28	65.83					
U	2.19	1.12	1.75	2.01	2.08	3.27	1.41	1.87	1.86	2.86	2.54	2.60	0.92	0.76	5.67					
ΣREE	406.03	600.59	305.85	326.21	323.45	428.08	545.26	408.68	352.39	156.58	154.67	155.21	8.83	85.22	82.66					
LREE/HREE	12.90	29.44	14.44	12.72	13.91	16.20	16.98	18.97	12.85	12.36	9.11	8.60	12.56	28.42	34.68					
(La/Yb) _N	12.67	53.25	19.14	15.41	18.08	18.59	21.26	26.90	16.84	12.60	9.46	8.83	12.55	48.47	27.23					
δEu	0.50	0.46	0.65	0.49	0.63	0.67	0.63	0.72	0.62	1.02	0.88	0.85	3.36	0.73	0.67					
δCe	1.04	0.85	1.02	0.98	0.99	1.01	0.98	1.04	1.01	0.97	0.97	0.98	0.93	0.94	0.98					

样品 B0518-1*、B0519-1*、B0519-2.1*、A003-6* 及 B0519-4* 数据引自李德(2009)。

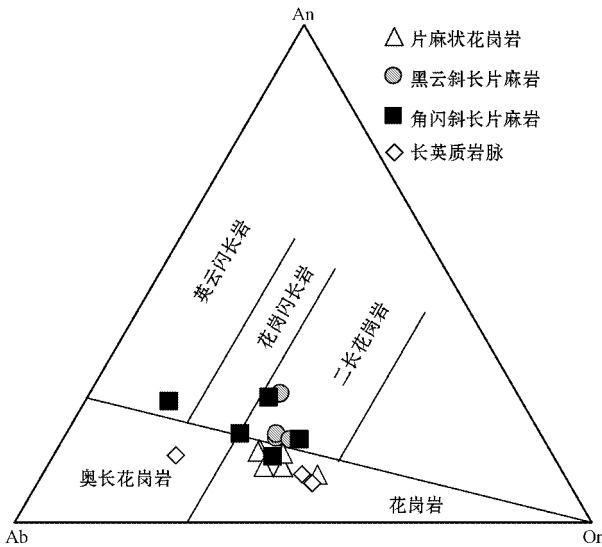


图 8 辽西台里地区片麻岩杂岩 An - Ab - Or 图(据 O'canor, 1965)

Fig. 8 An - Ab - Or diagram for the gneiss complex from Taili area of western Liaoning Province (after O'canor, 1965)

~6.25%) MgO(0.98%~3.27%) TiO₂(0.41%~0.69%) K₂O/Na₂O 值基本<1。在 An - Ab - Or 图解中相当于英云闪长岩-二长花岗岩(图 8)。SiO₂-K₂O 图解中显示角闪斜长片麻岩的 SiO₂ 含量变化较大,属钙碱性系列-钾玄岩系列(图 7b)。对比其岩相学特征发现, SiO₂ 含量越高,样品中新生矿物相比例越高,而 K₂O 含量可能与钾长石交代斑晶含量成正比,指示角闪斜长片麻岩的部分熔融程度不均一。

长英质岩脉具有高硅 SiO₂(76.09%~76.40%) K₂O(2.33%~4.95%) Na₂O(3.52%~4.89%), 贫 Fe₂O₃(0.85%~1.09%) CaO(0.71%~1.38%) MgO(0.13%~0.22%) TiO₂(0.03%~0.06%) 的特点,在 An - Ab - Or 图上相当于奥长花岗岩或花岗岩(图 8)。这与其富含斜长石和石英、低暗色矿物和副矿物的特点相对应。

本区新太古代片麻岩杂岩中各类岩石的主量元素具有良好的线性演化规律:随着 SiO₂ 含量的增加, K₂O、Na₂O 含量逐渐升高, Fe₂O₃、MgO、TiO₂ 等含量不断降低(表 2)。An - Ab - Or 图解显示,由角闪斜长片麻岩、黑云斜长片麻岩到片麻状花岗岩,具有从英云闪长岩向花岗岩演化的趋势。

4.2 微量元素

片麻状花岗岩的稀土元素总量(∑REE)具有一个较宽泛的变化区间(305.85 × 10⁻⁶ ~ 600.59 ×

10⁻⁶),轻稀土元素(LREE)富集而重稀土元素(HREE)亏损。轻重稀土元素分异程度和含量变化较大, LREE/HREE = 12.90~29.44 (La/Yb)_N = 15.41~53.25,显示了成分的不均一性,具有强-中等负 Eu 异常(δEu = 0.46~0.68)(图 9)。黑云斜长片麻岩的 ∑REE 总体要比花岗岩高,含量变化较小(352.39~545.26) × 10⁻⁶,稀土元素配分模式与花岗岩十分相似, LREE/HREE 比值也较大,为 12.85~18.97 (La/Yb)_N = 16.84~26.90,但总体比花岗岩要小,具有中等的负 Eu 异常(δEu = 0.62~0.72)(图 9)。

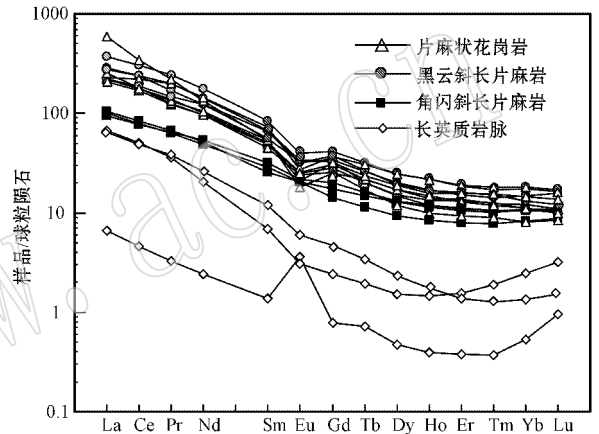


图 9 辽西台里地区片麻岩杂岩稀土元素球粒陨石标准化图(标准化值据 Boynton, 1984)

Fig. 9 Chondrite-normalized REE patterns of the gneiss complex in Taili area of western Liaoning Province (normalizing data after Boynton, 1984)

两类岩石明显富集大离子亲石元素(LILE: Rb、Ba、Th、U、K 等),亏损高场强元素(HFSE: Nb、Ta、Ti、P 等),并出现强烈的 Sr 亏损(图 10a)。其中,片麻状花岗岩的 Nb 等高场强元素相较黑云斜长片麻岩更亏损。

角闪斜长片麻岩的轻稀土元素相对富集,重稀土元素平坦,稀土元素总量及轻重稀土元素分异程度低于花岗岩和黑云斜长片麻岩, ∑REE = (154.67~156.58) × 10⁻⁶, LREE/HREE = 8.60~12.36 (La/Yb)_N = 8.83~12.60,出现微弱或不明显的负 Eu 异常(δEu = 0.85~1.02)(图 9)。在微量元素原始地幔标准化蛛网图中,该类岩石富集 LILE(Rb、Ba、Th、U、K),而相较花岗岩和黑云斜长片麻岩更亏损 HFSE(Nb、Ta、Ti、P 等),Sr 弱亏损或不亏损(图 10b)。

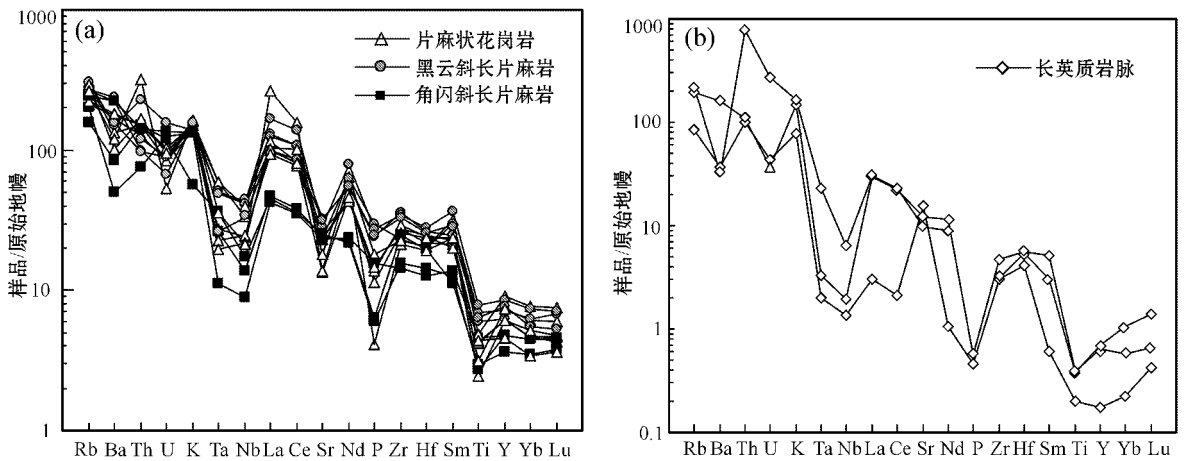


图 10 辽西台里地区片麻岩杂岩微量元素原始地幔标准化图(标准化值据 Sun and Mc Donough, 1989)

Fig. 10 Primitive mantle-normalized trace elements spider diagrams for the gneiss complex in Taiji area of western Liaoning Province (normalizing data after Sun and Mc Donough, 1989)

长英质岩脉的 ΣREE 总量很低 ($8.38 \times 10^{-6} \sim 85.22 \times 10^{-6}$), 总体呈现轻稀土元素富集的特征 (图 9)。其稀土元素配分模式分两类: 第 1 类 (样品 D012-1) 轻重稀土元素出现四组分效应, 正 Eu 异常明显 ($\delta\text{Eu} = 3.36$), $\text{LREE}/\text{HREE} = 12.56$ (La/Yb)_n = 12.55 (图 9); 第 2 类 (样品 D012-5、D095-1) 轻重稀土元素较分异, $\text{LREE}/\text{HREE} = 28.41 \sim 34.68$, (La/Yb)_n = 27.23 ~ 48.47, 出现弱的负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu} = 0.67 \sim 0.73$)。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图中, 3 个样品均表现出富集大离子亲石元素 Ba、Th、U、K; 明显亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti、P 等。另外, 样品 D012-1 出现 Sr 的富集而样品 D012-5、D095-1 无明显 Sr 富集 (图 10b)。

新太古代片麻岩杂岩总体体现出轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的分异特点, 各类岩石均富集 Rb、Ba 等大离子亲石元素、亏损 Nb、Ti 等高场强元素。长英质岩脉和黑云斜长片麻岩、片麻状花岗岩存在一定互补性, 表现为 LREE/HREE 比值由低到高, 正 Eu 异常 \rightarrow 弱负 Eu 异常 \rightarrow 强烈负 Eu 变化。熔融程度较低的角闪斜长片麻岩 (可能与原岩成分相当) 分布曲线介于这 3 类岩石间, 且稀土元素总量与 3 类岩石的平均加和值相当, 指示它们之间具有亲缘性和演化关系。

长英质岩脉之间微量元素分布特点的差异性可能与熔体的分离结晶有关。熔体萃取后迁移, 重稀土元素残留在固相致使熔体中重稀土元素含量低,

熔体开始分离结晶时, Eu 优先进入到长石中, 其余 LREE 和 HFSE 富集在残余熔体中, 使得脉体 (样品 D012-1) 中出现 Eu 正异常且富集 Sr, 具有 REE 和 HFSE 含量低的特点。而残留熔体中 Eu 亏损, 其结晶形成的长英质脉体 (样品 D012-5 和 E095) 出现 Eu 负异常, LREE、HFSE 含量增高。这也就解释了为什么黑云斜长片麻岩和片麻状花岗岩出现负 Eu 异常, 具有高的 REE 和 HFSE 含量。另外, 片麻状花岗岩与黑云斜长片麻岩的元素差异可能与部分熔融及随后熔体与残留体的逐渐分离有关。黑云斜长片麻岩中残留的早期矿物如黑云母和副矿物 (榍石、磷灰石、帘石等) 较多, 这些矿物是稀土及 Nb、P、Ti 等微量元素的主要赋存矿物, 致使其相对片麻状花岗岩稀土元素总量较高, Nb 等大离子亲石元素较富集。

5 讨论

5.1 台里地区新太古代片麻岩杂岩的岩石成因

岩相学特征显示, 片麻状花岗岩早期矿物及组构保留较少, 而晚期矿物含量较高, 熔融产物 (熔融残余结构、交代结构等) 十分发育, 部分熔融程度较高, 具有混合岩“新成体”特点; 黑云斜长片麻岩早期矿物含量较高, 熔融产物明显少于片麻状花岗岩, 具有熔融改造较弱的“原岩残留体”特征; 角闪斜长片麻岩早期矿物含量极高, 基本保留早期变质组构特征, 少有晚期矿物及熔融组构出现, 表明其部分熔融

程度更低,类似于混合岩中的“古成体”;长英质岩脉则基本由晚期矿物组成,具有熔体结晶特点,相当于混合岩的“浅色体”。

地球化学特征显示,杂岩中各类岩石主量元素具有良好的线性演化规律;从微量元素上看,各类岩石间的元素变化具有亲缘性,其元素表现的差异符合深熔过程中元素的迁移特点。

结合各类岩石在矿物组成和组构特点上的良好递变关系,我们认为,本区新太古代片麻岩杂岩中的各类岩石来源相同,是太古宙地壳经不同程度部分熔融再活化的产物。

5.2 同变形的深熔作用

本区新太古代片麻岩杂岩中片麻状花岗岩、黑云斜长片麻岩和角闪斜长片麻岩均发生韧性变形作用,糜棱组构较发育。受其影响,变形期前的长石和石英多发生亚颗粒化或定向拉长,黑云母和角闪石定向排列构成糜棱叶理,同变形期矿物如石英、长石聚集晶和微斜长石交代斑晶出现拉长、旋转及构造拖尾等现象(图 4a、4b、4e)。另外,长英质脉体(浅色体)多呈不规则状产出,常以褶曲肠状、顶厚褶皱状分布于角闪斜长片麻岩中(图 3d、3e),局部可呈定向分布(图 3f),表明部分熔融的熔体在形成过程中受到构造作用的影响,且深熔作用期间不同地点的应力状态不同。

这些特征均显示新太古代片麻岩杂岩在深熔过程中伴有同期的构造变形作用,标志着~2.5 Ga 期间本区受大规模的构造-深熔事件控制。

构造变形对本区新太古代片麻岩杂岩的深熔作用起到了重要的作用,其贡献在于:① 构造作用有利于部分熔融的进行,降低了岩石部分熔融的温度,使部分熔融程度增高。由于深熔作用期间不同地点应力状态的不同,可能促进了片麻岩杂岩部分熔融的不均一,使得部分岩石经历了较高的部分熔融,形成花岗岩,而部分岩石仅经历低度的部分熔融。② 构造变形促使熔体发生聚集并迁移(Solar *et al.*, 1998; Brown and Solar, 1999)。当变形作用与深熔作用同时发生时,在熔体压力和源区熔体周期性产出的共同作用下,会在岩层中产生一些“隧道”,在这些“隧道”周期性扩张和闭合的过程中熔体就能发生迁移(Brown and Solar, 1998; Weinberg, 1999; Solar and Brown, 2001)。在角闪斜长片麻岩和片麻状花岗岩中分布有囊状、无根脉状的中-伟晶粒度的长英质岩脉,局部见长英质岩脉侵入,并切割其片麻理,

指示熔体在结晶过程中发生聚集,并出现一定迁移。

5.3 华北克拉通~2.5 Ga 的地壳再造事件

华北克拉通最重要的构造岩浆热事件发生在 2.55~2.50 Ga,有别于全球其他克拉通(~2.7 Ga)构造岩浆热事件发育的特点(Condie, 1998)。现今,关于这期构造热事件的性质存在岛弧岩浆作用和底板垫托作用两种不同模式,如恒山-五台-阜平杂岩、恒山、怀安等地~2.5 Ga TTG 质片麻岩被认为是岛弧岩浆作用的产物(Zhao *et al.*, 2000; 刘树文等, 2007, 2011; 刘富等, 2009)。登封、冀东等地区出露的新太古代花岗质岩石则认为是与板底垫托作用有关(万渝生等, 2009; Yang *et al.*, 2009)。

台里地区新太古代片麻岩杂岩总体富 K、低 Mg[#]、高 A/NCK、低 Cr 和 Ni,与岛弧钙碱性火山岩的特征不太一致。李健(2009)对杂岩中具有新太古代表面年龄的锆石进行了 Hf 同位素分析,得出其锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -1.07~1.94,两阶段模式年龄分布在 2.8~3.0 Ga 之间,说明本区片麻岩杂岩可能为早期地壳物质部分熔融的产物。结合该套岩石富集大离子亲石元素(LILE)和亏损高场强元素,具有 Nb、Ta、Ti 的负异常等特点,可能暗示其成岩过程中有大量地壳物质参与。尽管不能据此完全排除新太古代末期新生地壳生长的可能,但至少可以认为台里地区~2.5 Ga 片麻岩杂岩可能主要来自 2.8~3.0 Ga 的地壳的再变质和再次部分熔融作用,是华北克拉通新太古代末期一次重要的陆壳再造事件的记录。

6 结论

(1) 台里地区新太古代片麻岩杂岩形成于~2.5 Ga,为一套深熔型混合岩。其中片麻状花岗岩为部分熔融程度最高的“新成体”;黑云斜长片麻岩为受熔体改造的“残留体”;角闪斜长片麻岩为熔融程度很低的“古成体”;长英质岩脉代表新生熔体结晶的产物,为“浅色体”。

(2) 台里地区新太古代片麻岩杂岩经历了同变形的深熔作用,这对该套杂岩部分熔融的进行和熔体的迁移起到了重要的作用。这一变形作用标志着~2.5 Ga 期间,研究区受大规模的构造-深熔事件控制。

(3) 台里地区新太古代片麻岩杂岩是由早期地壳物质在新太古代末期发生重熔形成,记录了华北

克拉通一期重要的陆壳再造事件。

致谢 本文得到中国科学院广州地球化学研究所龙晓平副研究员的帮助,在此表示诚挚的感谢!

References

- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies [A]. Henderson. Rare Earth Element Geochemistry [C]. Elsevier, 63~114.
- Brown M and Solar G S. 1998. Shear zone systems and melts: feedback relations and self-organization in orogenic belts [J]. Journal of structural Geology, 20: 211~227.
- Brown M and Solar G S. 1999. The mechanism of ascent and emplacement of granite magma during transpression: a syntectonic granite paradigm [J]. Tectonophysics, 312: 1~33.
- Cheng Yuqi, Wan Yusheng, Gao Jifeng, et al. 2001. Petrographic characteristics of three anatexically transformed metamorphic rock types of the Fuping Group-complex of the Xiaojue region, Pingshan, Hebei [J]. Geological Review, 1: 1~8 (in Chinese with English abstract).
- Condie K C. 1998. Episodic continental growth and supercontinents: a mantle avalanche connection? [J]. Earth and Planetary Science Letters, 163: 97~108.
- He Tongxing, Lin Qiang, Fang Zhanren, et al. 1992. The Petrogenesis of Archean Granite in Jidong Area [M]. Jilin: Jilin Science and Technology Press, 74~158 (in Chinese with English abstract).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Liaoning Province. 1989. Regional Geology of Liaoning Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 15~43 (in Chinese with English abstract).
- Li Jian. 2009. Characteristics of Granitic Rocks and Its Geological Significance in Taili Area of Western Liaoning Province [D]. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Tang Guoqiang, Gong Bing, et al. 2012. Qinghu zircon: A working reference for microbeam analysis of U-Pb age and Hf and O isotopes [J]. Chin. Sci. Bull., 58(20): 1954~1961 (in Chinese).
- Liu Fu, Guo Jinghui, Lu Xiaoping, et al. 2009. Crustal growth at ~2.5 Ga in the North China Craton: evidence from whole-rock Nd and zircon Hf isotopes in the Huai'an gneiss terrane [J]. Chinese Sci. Bull., 54(17): 2517~2526 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shuwen, Lü Yongjun, Feng Yonggang, et al. 2007. Geology and zircon U-Pb isotopic chronology of Dantazi complex, northern Hebei Province [J]. Geological Journal of China Universities, 13(3): 484~497 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shuwen, Lü Yongjun, Wang Wei, et al. 2011. Petrogenesis of the Neoproterozoic granitoid gneisses in Northern Hebei Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 27(4): 909~921 (in Chinese with English abstract).
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. Bull. Geol. Soc. Am., 101: 635~643.
- O Connor J T. 1965. A classification for quartz-rich igneous rock based on feldspar ratios [J]. U. S. Geol. Sur. Prof. Paper, 525: B79~B84.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey [J]. Contrib. Mineral. Petrol., 58: 63~81.
- Solar G S and Brown M. 2001. Petrogenesis of migmatites in Maine, USA: Possible source of peraluminous leucogranite in plutons? [J]. Journal of Petrology, 42(4): 789~823.
- Solar G S, Pressley R A, Brown M, et al. 1998. Granite ascent in convergent orogenic belts: Testing a model [J]. Geology, 26: 711~714.
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 5: 495~500 (in Chinese with English abstract).
- Stacey J S and Kramers J D. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 26: 207~221.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Nory M J. Magmatism in the Ocean Basins [C]. London: Geological Society Special Publication, 42: 313~345.
- Wan Yusheng, Liu Dunyi, Wang Shiyan, et al. 2009. Early Precambrian crustal evolution in the Dengfeng Area, Henan Province (Eastern China): constraints from geochemistry and SHRIMP U-Pb zircon dating [J]. Acta Geologica Sinica, 83(7): 982~999 (in Chinese with English abstract).
- Weinberg R. 1999. Mesoscale pervasive felsic magma migration: Alternative to dyking [J]. Lithos, 46: 393~410.
- Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, et al. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace-element and REE analyses [J]. Geostand. Newsl., 19: 1~23.
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Studies on genesis mineralogy of zircons and its constrain to the explanation for U-Pb isotope dating [J]. Chinese Science Bulletin, 49(16): 1589~1604 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Wilde S A, et al. 2009. Petrogenesis and geodynamics of Late Archean magmatism in Eastern Hebei, eastern

- North China Craton: geochronological, geochemical and Nd-Hf isotopic evidence [J]. *Precambrian Research*, 167: 125~149.
- Zhao Guochun, Cawood P A, Wilde S A, *et al.* 2000. Metamorphism of basement rocks in the central zone of the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic tectonic evolution [J]. *Precambrian Research*, 103(1~2): 55~88.
- Zheng Peixi, Jin Wei, Zhou Yan, *et al.* 2009. Zircon U-Pb age and geological significance of the Taizili granitic gneiss from western Liaoning Province [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 3: 455~459 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 程裕淇, 万渝生, 高吉凤, 等. 2001. 河北平山小觉地区阜平岩群中三种岩类深熔现象的岩相学特征 [J]. *地质论评*, 1: 1~8.
- 贺同兴, 林强, 方占仁, 等. 1992. 冀东太古宙花岗岩成因 [M]. 吉林科学技术出版社, 74~158.
- 李健. 2009. 辽西台里地区花岗岩岩石特征及其地质意义 [D]. 长春: 吉林大学.
- 李献华, 唐国强, 龚冰, 等. 2012. Qinghu (清湖) 锆石: 一个新的 U-Pb 年龄和 O、Hf 同位素微区分析工作标样 [J]. *科学通报*, 58(20): 1954~1961.
- 刘富, 郭敬辉, 路孝平, 等. 2009. 华北克拉通 2.5 Ga 地壳生长事件的 Nd-Hf 同位素证据: 以怀安片麻岩地体为例 [J]. *科学通报*, 54(17): 2517~2526.
- 刘树文, 吕勇军, 凤永刚, 等. 2007. 冀北单塔子杂岩的地质学和锆石 U-Pb 年代学 [J]. *高校地质学报*, 13(3): 484~497.
- 刘树文, 吕勇军, 王伟, 等. 2011. 冀北太古代片麻状花岗岩的成因 [J]. *岩石学报*, 27(4): 909~921.
- 辽宁省地质矿产局. 1989. 辽宁省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 15~43.
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表 [J]. *岩石矿物学杂志*, 28(5): 495~500.
- 万渝生, 刘敦一, 王世炎, 等. 2009. 登封地区早前寒武纪地壳演化——地球化学和锆石 SHRIMP U-Pb 年代学制约 [J]. *地质学报*, 83(7): 982~999.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约 [J]. *科学通报*, 49(6): 1589~1604.
- 郑培玺, 金巍, 周燕, 等. 2009. 辽西地区台子里片麻状花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 3: 455~460.

www.yskw.com.cn