

麻山杂岩的变质-混合岩化作用和花岗质岩浆活动^{*}

任留东¹ 王彦斌¹ 杨崇辉¹ 韩娟¹ 颀颜强¹ 李林山²

REN LiuDong¹, WANG YanBin¹, YANG ChongHui¹, HAN Juan¹, XIE HangQiang¹ and LI LinShan²

1. 中国地质科学院地质研究所,北京 100037

2. 黑龙江省第六地质勘察院,佳木斯 154002

1. Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China

2. The Sixth Geologic Survey of Heilongjiang Province, Jiamusi 154002, China

2010-05-01 收稿, 2010-06-15 改回.

Ren LD, Wang YB, Yang CH, Han J, Xie HQ and Li LS. 2010. Metamorphism, migmatization and granites of the Mashan Complex in Heilongjiang Province, Northeast China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7):2005–2014

Abstract Both high-grade and middle-grade metamorphisms are developed in the Mashan Complex in the Jiamusi Block, Heilongjiang Province, Northeast China. In the high-grade area occurs the migmatization related with anatexis, while intensive injection migmatization prevails in the whole Mashan Complex. As the presence of euhedral plagioclase, albite rim along earlier plagioclase, the transformation textures of biotite to hornblende in the leucocratic granitic veins or bodies. It is deduced that the migmatization was predominantly derived from the magmatic injection from the deep, rather than in-situ anatexis after high-grade metamorphism. The anatexis was confined to granulite metamorphism area while the injection migmatization were widespread. With the age of ca. 500Ma, the injection migmatization was responsible for the amphibolite-facies metamorphism in the large area and retrograde grade metamorphism in the high-grade part. The middle-grade metamorphism was resulted from, not in, the injection migmatization. Although demonstrating some features of S-type granite, the synthetic analysis of mineral assemblages and geochemical characteristics show that the migmatization granite was basically I-type, or the KCG type of Barbarin (1999). The magmatism occurred in the transitional period from compression to extension. Both the metamorphism and migmatization features of the Mashan Complex suggest that some tectono-thermal activity similar to the Pan-african event in the Gondwana took place at the southern margin of the Siberian Craton, and the scale here may be smaller and there was a rapid shift of structural regime from metamorphism to tremendous magmatism activity.

Key words Anatexis; Injection migmatization; Granite; Mashan Complex; Jiamusi Block

摘要 在黑龙江佳木斯地块麻山杂岩中可分别有高级和中级变质作用部分,两处均可见混合岩化作用。通过混合岩浅色脉体或花岗质脉体中的长石自形晶、斜长石周围的钠长石净边、黑云母向角闪石的转化等现象表明混合岩化作用主要表现为深部岩浆的注入,而不仅是高级变质之后的近原地深熔作用所致,高级变质与相关的深熔作用所致混合岩化在区域上的分布是有限的,集中于西麻山的高级区;而注入式混合岩化是普遍的,其产出可遍布所有麻山杂岩的出露区,在麻粒岩相和角闪岩岩相部位均可出现。早期麻粒岩相变质与后期混合岩化作用应是相互独立的构造或热事件;注入式混合岩化引起了中级变质作用和高级区的退变质作用,注入混合岩化作用的年代约为500Ma;中级变质作用是注入混合岩化的结果,而不是混合岩化的原因。与注入混合岩相关的花岗岩虽然表现出一些S型花岗岩的特征,但根据矿物组合、地化性质的综合分析,更可能是富钾及钾长石斑晶的钙碱性花岗岩类,属于I型花岗岩,形成于挤压向引张转化的过程中。麻山杂岩的变质与混合岩化特征表明,以西伯利亚古陆为中心的南部边缘发生了与冈瓦纳陆块内泛非事件类似的构造活动,只不过这里的规模略小,在变质之后迅速发生了构造体系的转换,而形成大量花岗质岩浆活动。

关键词 深熔作用;注入式混合岩化;花岗岩;麻山杂岩;佳木斯地块

中图法分类号 P597.3; P588.3

* 本文受国土资源大调查项目(1212010811048, 1212010811033, 1212010611802 和 1212010711509)资助。

第一作者简介:任留东,男,1965年生,博士,研究员,主要从事南极地质和变质地质研究, E-mail: ldren@cags.ac.cn

1 引言

“混合岩”这一术语是由 Sederholm (1907) 所创立的,用来描述一种由非花岗质的变质岩部分和花岗质岩、或偏离花岗质和接近花岗质组分两部分混合而成的非均质岩石,使用过程中一般仅用来做描述术语,而不赋予其成因含义。

Sederholm (1907) 认为这种岩石是由较老的岩石(原岩)和外来的花岗质岩浆或岩汁(ichor)混合形成,并以脉状体分布于岩石中。大致同时,瑞典的 P. J. 霍尔姆奎斯特认为混合岩中的脉状体没有外来物质的加入,它是原岩通过变质分异作用而产生。后来有人认为是原岩经熔(溶)融作用生成。对混合岩成因的解释,尚未取得一致意见。其实,这两种现象在自然界都存在。混合岩中含有不同比例的基本未变或变化较小的原岩组分或“古成体”和新生组分或“新成体”。原岩组分活动性一般较差,而新生组分多属活动组分。在原岩组分中除不同成分的长石或一定的石英外,常含较多的黑云母、角闪石、辉石等铁镁矿物。新生组分一般主要由长英质或花岗质,有时由含钾、钠等的流体交代原岩组分而形成。其中有的来源于附近的花岗质侵入体,有的可能来自更远或更深的地方。有时这种新生组分主要是原岩经变质分异或经部分熔(溶)融形成的硅酸盐流体相的产物。

在形成过程的初级阶段,岩石中的新生组分,往往形成长英质或花岗质的各种脉状体或不规则条带,以长石为主的交代斑晶,分布于原岩组分中,两者间的界限往往较清楚。称新生组分为脉体,原岩组分为基体。随着混合岩化程度加深,混合岩的组成和结构,向着均匀化方向发展,外表渐呈厚层状和块状。原岩组分已受到较深的改造,在组成物质或外貌上,都不易同新生组分别,其中属于交代成因的,原岩几乎全部经历交代作用,属于就地熔融的,则在最后凝固以前,大部分可能曾达到流体状态。

从成因上来说,形成混合岩的机制可有四种:外来岩浆注入、原地深熔作用、交代作用和变质分异作用。其中变质分异和深熔作用属于封闭体系,体系总成分接近母岩成分,而变质交代和岩浆注入作用则属于开放组分过程,尤其后者,所形成的混合岩中的花岗质组分部分与母岩成分无关。实际上,尤以前两种机制为主。在我国,有一种趋势是把大部分的混合岩的形成简单归因于深熔作用(重熔作用, anatexis)。

深熔作用常见于造山带核部的高级变质地质体中,对于地壳中物质的迁移和化学组分的重新分配是一种重要的地质过程。一般说来,深熔作用涉及一系列复杂的含流体和不含流体的熔融反应,从而产生一些与其原岩组成体系不平衡的熔体(Whittington and Treloar, 2002; Harris and Inger, 1992; Tommasini and Davies, 1997)。发生地壳熔融的主要构造环境为大陆岛弧和碰撞带(Brown *et al.*, 1995),在大陆岛弧还涉及相当量的幔源熔体如钙碱性花岗岩的产生

(Patiño Douce, 1999),即地壳物质的增生;在总体聚敛型造山带中,应变分解使得深部形成收缩性构造,同时在地壳上部为引张性构造(Brown, 2001, 2007)。在不同的构造背景下,地壳深熔作用可以是下列过程中的一种或多种所造成的:(1)在碰撞造山带(如喜马拉雅)具有丰富生热元素的地壳物质的下部逆冲造成的热效应所引起的(Inger and Harris, 1993; Patiño Douce *et al.*, 1990);(2)更深部基性岩浆体系侵位导致的热扰动(Bergantz, 1989; Huppert and Sparks, 1988);(3)流体驱动的熔融(Patiño Douce and Harris, 1998);(4)在高级变质地质体快速剥露过程中所引起的降压熔融(Carson *et al.*, 1997; Patiño Douce and Harris, 1998)。在中-下地壳麻粒岩快速构造剥露过程中,降压熔融导致巨大的造山后花岗岩的形成。

若混合岩中的浅色体(新生组分)来源于附近的花岗质侵入体,甚至更远或更深的地方,那么,此时浅色脉体的成分与混合岩中的变质岩部分基本没有关系,脉体的形成只不过反映了一次岩浆的活动事件。

在黑龙江佳木斯地块的麻山杂岩中,从变质程度上可分出至少两种类型,一种为麻粒岩相变质部分,如鸡西西南柳毛石墨矿附近的麻山杂岩(图1);另一部分是变质仅达角闪岩相变,如桦南和萝北附近的麻山杂岩。两种变质部位既表现出不同的变质、深熔作用特点,在麻粒岩相部分的长英质片麻岩中,形成明显的浅色条带,浅色条带的出现可与高级变质之后的深熔作用有关(Kriegsman, 2001),亦可由混合岩化作用形成;而区域更广泛的角闪岩相变质部分的深熔作用极其微弱;两部分之间又有一些共同的性质,均发生了明显以岩浆注入为主的混合岩化作用(钾化为主)及伴随的花岗岩类的侵入。本文即试图把这两种现象进行区分并探讨其地质意义。

2 区域地质

黑龙江鸡西市西南方向麻山、柳毛一带产出一套富含石墨、夕线石等非金属矿物的变质岩系,浅野一郎(1941,转引自李德荣和党廷松,1993)将其命名为麻山统,认为可与印度、斯里兰卡等地孔兹岩系进行对比。中国科学院黑龙江流域综合考察队(1963)小兴安岭分队在1956~1959年的调查期间将其改称麻山群。关于其时代有多种认识,自新太古代至新元古代均有提及;地层典中将其归入古元古代,并称之为麻山岩群(引自吴昌华,1996)。该岩系遭受到麻粒岩相变质作用和强烈的混合岩化作用。

刘静兰(1988)提出麻山地区变质岩系的原岩和变质作用特征均不同于佳木斯地块范围内其他地区的原麻山群,鸡西麻山群是高级变质区,其余麻山群相当于花岗-绿岩带。

黑龙江省区域地质志(黑龙江省地质矿产局,1993)将鸡西-林口地区的含石墨富铝的麻粒岩相变质岩系称为麻山群,而将勃利-萝北地区(大盘道地区)以黑云斜长变粒岩夹

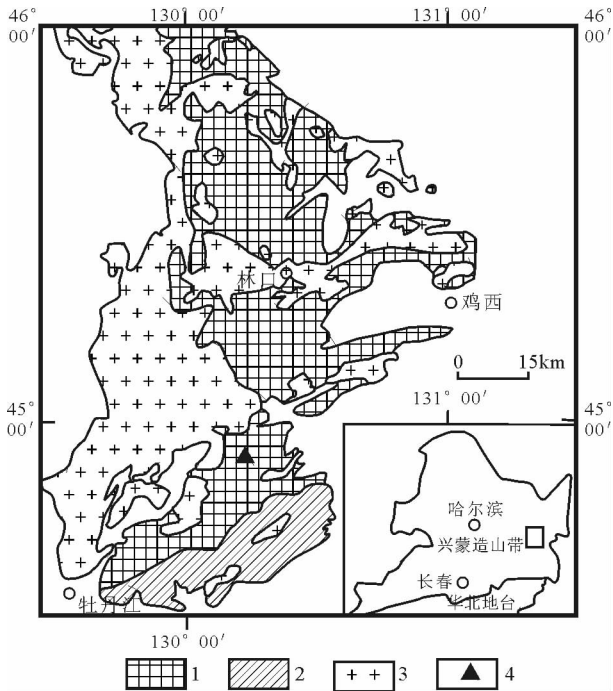


图1 黑龙江麻山杂岩地质简图(据吴福元等, 2001 修改)

1-麻山杂岩; 2-黑龙江杂岩; 3-石炭纪花岗岩; 4-锆石取样点位置

Fig. 1 Schematic geological map of Mashan Complex, Heilongjiang Province (revised after Wu *et al.*, 2001)

1-Mashan Complex; 2-Heilongjiang Complex; 3-Granite of Carboniferous; 4-Sample locality for zircon dating

含磁铁石英岩的变质岩系称兴东群。麻山群和兴东群之间相隔3~5km的花岗岩带, 尽管两地均有石墨矿, 但各自的变质岩石组合、原岩建造、变质作用、花岗岩类型和构造变形样式均有不同: 鸡西-柳毛地区为轴向近东西的复背形构造, 核部变质程度最深, 已达麻粒岩相(姜继圣, 1992; 卢良兆等, 1996)。而勃利-林口地区则为近南北向的片麻岩穹窿(花岗岩质片麻岩穹窿区), 穹窿区内部属低角闪岩相(Bt-Ms ± Sil ± Grt ± Grp), 周边则为低压绿片岩相, 以片岩为主, 靠近花岗岩片麻岩局部可见石榴子石、夕线石和红柱石(Bt-Ms ± Grt ± St ± And)(卢良兆等, 1996)。花岗岩质片麻岩穹窿区相关岩石如云母片岩、片麻岩比鸡西-柳毛一带的麻山群岩石更富钠贫铝(姜继圣, 1996)。1: 20 万区调和一些研究把二者统归麻山群。这些岩石中强烈的构造置换和改造表明, 简单的地层层序概念不能适用于该区的研究, 为此, Wilde *et al.* (2001)把鸡西麻山群(或狭义麻山群, 下称鸡西麻山杂岩)、花岗岩质片麻岩穹窿区和兴东群统称“麻山杂岩”。

麻山杂岩的主要特征是副片麻岩中往往有石墨, 即使大理岩中亦是如此, 以及明显的混合岩化, 尤其是钾质花岗岩的产出。这是麻山杂岩区域对比的重要标志。

兴凯地块的兴凯群在岩石建造、变形-变质性质及时代等方面与麻山杂岩非常一致(Zhou *et al.*, 2010), 在这里一

并当作麻山杂岩的一部分对待。

3 研究思路和方法

高级变质之后的深熔作用可形成混合岩化, 岩浆注入亦可造成混合岩化, 并形成花岗岩, 但是, 这两种混合岩化有着本质的区别, 本文尝试以其不同的发生机制、岩相结构来区分这两种不同的混合岩, 并对混合岩化发生的时代、成因进行分析 and 讨论, 探讨其地质环境。

4 岩相和结构特征

在麻粒岩相麻山杂岩中发育特征的与高级变质有关的混合岩化作用, 形成明显的浅色花岗岩条带(图2a), 这些条

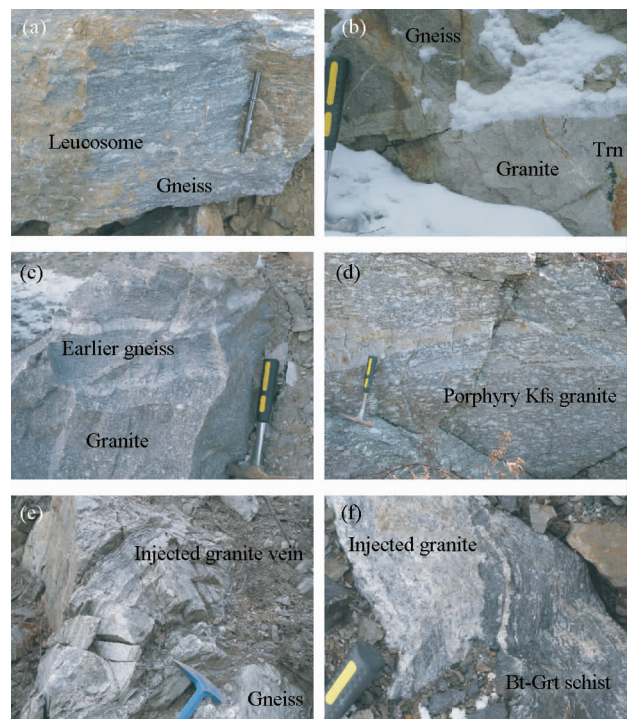


图2 麻山杂岩中变质岩、混合岩及花岗岩的野外照片

(a)-高级变质期间的深熔条带, 细长浅色条带; (b)-高级变质之后的花岗岩沿片麻岩裂隙注入; (c)-高级变质之后的花岗岩化, 片麻理呈残影状; (d)-高级变质之后的片麻状钾长斑晶花岗岩; (e)-中级变质之后的岩浆注入, 与片麻理小角度斜交; (f)-中级变质片岩中的花岗岩注入体

Fig. 2 Outcrops of the gneisses, migmatites and granites in Mashan Complex

(a)-Anatexis stripes in the high-grade gneiss; (b)-Injected granite along the fracture; (c)-Granitization after high-grade metamorphism, with the residual gneiss fragment; (d)-Gneissic porphyry Kfs granite; (e)-Injected granite in the amphibolite-facies schist, small angle with the foliation; (f)-Injected granite in the amphibolite-facies schist

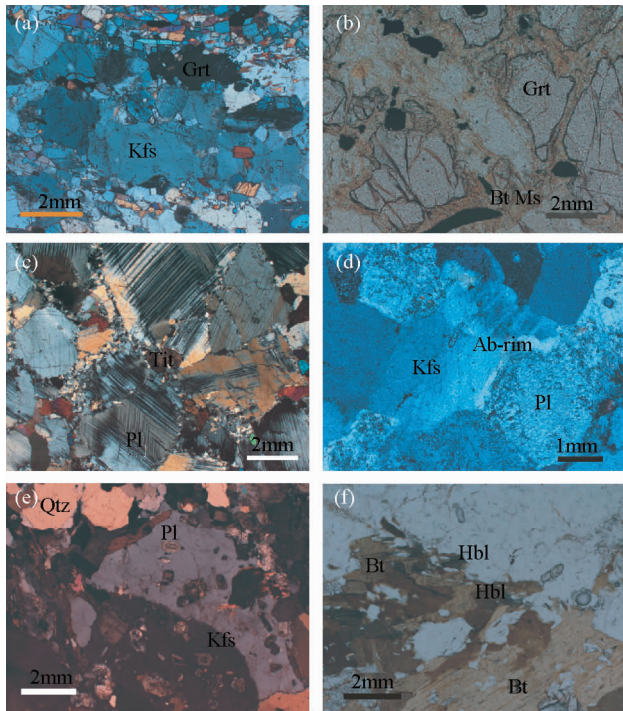


图3 麻山杂岩中相关岩石的显微结构

(a)-麻粒岩相组合(钾长石-斜长石-夕线石-石榴子石-黑云母);
(b)-麻粒岩相组合退变质(石榴子石退变为黑云母、白云母);
(c)-辉石-斜长石粒间形成榍石和碎裂结构;(d)-早期斜长石边缘的钠长石净边(紧邻钾长石);(e)-钾长石具卡氏双晶,并包裹早期自形斜长石;(f)-混合岩中黑云母向角闪石的转化

Fig. 3 Microphotographs of the related rocks in Mashan Complex

(a)-Granulite-facies assemblage (Kfs-Pl-Sil-Grt-Bt); (b)-Retrograded assemblage after granulite-facies metamorphism (Grt retrograded to Bt and Ms); (c)-Titanite and fine-grained Pl along the boundary between pyroxene and plagioclase; (d)-Albite rim along the earlier Pl grain (adjacent the Kfs margin); (e)-Calsbad twin of Kfs, with inclusion of earlier Pl; (f)-Biotite transformed into amphibole the migmatite

带较窄,宽度一般不超2cm,通常与片麻理和谐一致。片麻岩中常见矿物组合为石榴子石、夕线石、钾长石、斜方辉石、斜长石、尖晶石、堇青石、石英、黑云母、石墨和退变矿物如白云母、镁铁闪石,甚至帘石、绿泥石等,黑云母可发生槽化,在堇青石之后可出现钾长石。片麻岩中可发育蠕英石结构,而浅色体的矿物组合为 $Qtz + Kfs \pm Pl \pm Bt \pm Grt$ 。

在鸡西麻山杂岩外围更广泛的区域,花岗片麻岩区变质程度仅达角闪岩相,甚至绿片岩相,却可以出现较为宽大的花岗质脉体(图2e, f),其矿物组合: $Kfs + Pl + Qtz + Bt + Ms$,其中早期斜长石颗粒多细小,呈自形-半自形晶(图3d),随后的钾长石(微斜长石为主,偶尔正长石或条纹长石)常具有卡氏双晶(图3e);镁铁质暗色矿物以黑云母为主,偶见角闪石,且有着黑云母向角闪石转化的迹象(图3f);常见白云

母、帘石和榍石;见蠕英石,尤其是早期斜长石的周边生长钠长石净边,而晚期与钾长石同时形成的较大斜长石周围多无净边,但可具环带。

麻粒岩相麻山杂岩中退变质现象比较普遍。除麻粒岩相变质矿物组合外,晚期不均匀叠加的绿片岩相退变质矿物或组合较为发育。片麻岩中多出现白云母(图3b)或榍石,斜长石粒间有碎化结构,形成 $Pl_2 + Cal$ 退变组合(图3c),片麻岩中叠加的白云母-方解石-石英组合、角闪辉石岩中阳起石-绿帘石组合、绿泥石-方解石-萤石组合、钙硅酸盐岩中的透闪石-蛇纹石组合等。

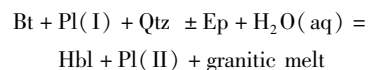
5 混合岩化的性质

在麻粒岩相麻山杂岩中发育特征的与高级变质有关的深熔作用及其导致的混合岩化作用,具体表现为形成细窄的浅色条带、和谐状浅色体,富石英、钾长石,贫斜长石($Qtz + Kfs \pm Pl \pm Bt \pm Grt$)(图2a),并见部分熔融反应的矿物组合,如黑云母转化形成石榴子石、斜方辉石、钾长石、堇青石的结构(图3a),这都是典型的无水部分熔融的结果(Kriegsman, 2001)。绝大多数花岗岩的产生与脱水熔融反应有关,但这种反应多发生在高角闪岩相-麻粒岩相变质条件下,往往伴随部分或多数上述矿物的出现(Brown, 2007)。尽管在稍低温($\sim 700^\circ C$)、有流体存在的条件下可以发生一致熔融,但此时所形成的熔体多为奥长花岗质,而无 $Kfs + Sil + Bt$ 共生(Patiño Douce and Harris, 1998; Zeng *et al.*, 2005),与本区大多数花岗岩富钾质有所不同。

除此之外,在高级区内还可出现与深熔所致混合岩不同的混合岩化作用,其形成较宽的、切割片麻理的浅色体或脉体($Kfs + Pl + Qtz + Bt + Ms$)(图2b)。根据下面的分析,这些混合岩脉体很可能为岩浆注入所致。

(1) 浅色脉体或花岗质岩石中钾长石典型的卡氏双晶、早期斜长石自形晶均表现为岩浆结构特征(Zeck, 1970; Vernon, 1988);花岗质脉体中常发育明显的蠕英石结构和钠长石净边现象(图3d)。Peng (1970)认为,粒间钠长石净边结晶于残余岩浆流体,并交代钾长石,而不是钾长石出溶所致。蠕英石可产于岩浆岩或变质岩中,而钠长石净边仅见于岩浆岩中(任留东等,待刊资料)。

(2) 黑云母向角闪石的转化被当作有水深熔作用的依据(Mogk, 1992),实际上,除了与麻山杂岩紧邻的石炭纪花岗岩(吴福元等,1999)外,在南坨子沟与低角闪岩相(变质组合 $Grt + Bt + Hbl + Pl + Kfs \pm Ep + Qtz$)变质岩相伴的混合岩中亦可见到类似的转化(图3f),该转化更是说明了体系的岩浆性质(任留东等,待刊资料)。浅色体中黑云母转化为角闪石,可能反映了K、Na等熔体组分形成长石之后Mg、Fe等组分参与变质过程:



但是并没有与此反应有关的深熔或熔融结构的出现以及发生深熔的温度条件(下面第3点的描述)。

即含水岩浆体系中的镁铁组分在接近变质作用的条件下结晶形成黑云母、角闪石,实际上,这种转化与高级变质深熔形成浅色体应是基本相反的过程。

(3)这些浅色体或花岗质脉体无法通过变质或深熔作用形成,因为,除了少量的狭义麻山群达麻粒岩相变质,可经历典型的深熔作用外,大部分的麻山杂岩(如兴东群)片(麻)岩仅达中-低级变质程度,如孟家岗铁矿的片岩中产出的花岗岩浅色脉(图2f),片岩矿物组合 $\text{Gr} + \text{Bt} + \text{Ms} + \text{Kfs} (\text{Mc}) \pm \text{Pl} (\text{Ab} - \text{rim}) + \text{Qtz}$, 仅为角闪岩相,变质条件远不足 700°C ,但其中晚期钾化明显,却未见到部分熔融反应的岩相证据,如黑云母转化形成石榴子石、斜方辉石、钾长石、堇青石的结构(Kriegsman, 2001)。依靠侵入体引起深熔作用的情况(Jung *et al.*, 1998a)在本区似乎没有发生。另外,地壳岩石熔融形成大规模花岗质岩石需要超过 $\sim 900^\circ\text{C}$ 的温度(如Vielzeuf and Montel, 1994),而且,岩相学和实验岩石学表明,只有当源区具有大量含水矿物时才可以形成大量花岗质熔体,若少水或无水(如麻粒岩相麻山杂岩)高级变质岩并不能产生大量的熔体(如Clemens and Vielzeuf, 1987; Vielzeuf and Montel, 1994)。Misch(1968)也讨论了一些混合岩非深熔成因的可能性。

(4)与注入混合岩化有关的退变质作用形成了楣石、白云母、帘石,甚至绿泥石、方解石。当然,白云母可以是退变形成,也可能是岩浆结晶的结果(Jung *et al.*, 1998a)。在麻粒岩相变质部位的片麻岩,这种退变质作用尤为明显。一般来说,深熔作用所致浅色体的矿物组合与片麻岩中的组合往往一致,而且,浅色体本身不能使麻粒岩相组合发生明显的退变质。这种退变质现象本身的存在即说明注入混合岩化与前期的麻粒岩相变质不属于同一个变质过程。退变质作用恰好反映了与注入混合岩化有关的变质性质。

这些现象均表明浅色脉体的形成与外来岩浆的注入有关(图2e),浅色体多显示典型的岩浆结构特点,表现为岩浆的活动。深熔作用可导致混合岩化,但岩浆的注入形成的混合岩化(钾化为主)(图2f)则占主导地位。

即使在高级变质和深熔作用的发育部位,亦可见典型的岩浆注入导致的混合岩化现象(图2b)。这种浅色脉体中的长石以钾长石为主,可平行片麻理,亦可切割片麻理,形成混合岩、具片麻岩残影的花岗岩(图2c),或片麻状钾长石斑晶花岗岩(图2d)。

因此,高级变质与相关的深熔作用所导致的混合岩化在区域上的分布是有限的,集中于西麻山的麻山杂岩中,而注入式混合岩化是普遍的,在麻粒岩相和角闪岩相部位均可出现,其产出可遍布所有麻山杂岩的出露区。

根据石榴花岗岩对片麻岩的包裹关系,退变质作用反映了与注入式混合岩化有关的变质改造,如混合岩化使得早期矿物石榴子石、黑云母、夕线石、长石被蚀变(退变),尤其

是石榴子石、夕线石的碎裂、蚀变显著,沿石榴子石裂隙或周边形成退变云母(主要为黑云母)(图3b),黑云母沿边部或两端形成退变白云母,造成部分片麻岩中较明显的白云母化;条纹长石可转化为微斜长石。因原岩普遍富碳,中-高级变质均可形成石墨,岩浆注入造成的混合岩或伟晶岩化更是加强了石墨的重结晶或粗化。

虎头镇西的兴凯地块上的兴凯群亦表现出与麻山杂岩类似的特征,即在经历高级变质-深熔作用和相应的深熔混合岩化之后,又发生了注入混合岩化的叠加。而在一些中级变质片麻岩中,除黑云母、角闪石、楣石的组合外,亦可见黑云母向角闪石的转化及斜长石周围钠长石的净边,直接发生了岩浆的注入活动。

总之,麻山杂岩中只有少部分的混合岩、花岗岩形成于高级变质作用之后的原地深熔作用,大部分的混合岩和花岗岩来源于更深部的活动如深熔作用或其它机制。也就是说,多数混合岩及花岗岩的成分与露头范围内的变质岩不应有直接的联系。这也是麻山杂岩变质作用、深熔作用、混合岩化、岩浆活动以及退变质作用均有显示并使变质岩石结构异常复杂的原因。

6 混合岩化的年代

关于麻山杂岩的年龄,有多种认识且分歧较大。如党延松和李德荣(1993)认为可能属于晚太古代, *Wilde et al.* (2001)对西麻山副片麻岩中碎屑锆石的SHRIMP测定结果限定了其源岩年龄为新、中、古元古代,岩石时代应属新元古代。麻山杂岩的岩石主体年龄并无定论。至于变质事件的年代,根据变花岗岩、深熔脉体和部分可能为变质成因的锆石的年龄数据限定为 $\sim 500\text{Ma}$ (宋彪等, 1997; *Wilde et al.*, 2000),而相伴的花岗岩活动年龄介于 $\sim 515\text{Ma}$ 和 $\sim 525\text{Ma}$ 之间,认为与冈瓦纳古陆的泛非时期相当(*Wilde et al.*, 1999, 2000, 2001, 2003, 2008)。Wu *et al.* (2007)测得麻山杂岩斑状花岗岩、伟晶岩的时代为 $515 \sim 530\text{Ma}$,其后 $\sim 500\text{Ma}$ 发生了高级变质作用。

斑状花岗岩的年龄 $515 \sim 530\text{Ma}$,变质事件却只有 500Ma 。这里有一个问题,麻山杂岩的麻粒岩相变质属于顺时针 *PT* 轨迹(姜继圣, 1992, 1996; 卢良兆等, 1996),若岩浆与变质或深熔有关,应该在峰期变质之后发生岩浆活动。可这里岩浆活动比变质事件更早发生,有人认为麻山杂岩的形成位于俯冲带一侧(*Wilde et al.*, 2003),即岩浆与变质作用没有直接联系。

实际上,有时在钾长石斑晶花岗岩中可产出片麻岩包体(图2b),更多的情形是,花岗岩中有不少夕线石、石榴子石、尖晶石甚至长石、石英等变质矿物的残留,说明与混合岩化有关的岩浆作用晚于变质事件。

本文所测样品采自穆棱市南坨子沟河东三兴村麻山群混合花岗岩(样品M24-6)。根据上述分析和野外观察,该样

表1 锆石 LA-ICP-MS U-Th-Pb 测试结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon analytical data

测点号	含量 ($\times 10^{-6}$)				同位素比值						年龄 (Ma)					
				$\frac{\text{Th}}{\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	
	Pb	Th	U		1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ		
M24-6-1	49	239	753	0.32	0.0566	0.0002	0.622	0.004	0.0797	0.0005	477	7	491	3	494	3
M24-6-2	50	248	805	0.31	0.0565	0.0002	0.615	0.006	0.0790	0.0007	471	9	487	4	490	4
M24-6-3	51	255	741	0.34	0.0566	0.0003	0.618	0.006	0.0792	0.0008	476	10	489	3	491	5
M24-6-4	46	245	731	0.34	0.0569	0.0002	0.631	0.004	0.0805	0.0005	487	7	497	3	499	3
M24-6-6	52	273	723	0.38	0.0568	0.0003	0.616	0.007	0.0787	0.0008	483	11	488	4	488	5
M24-6-7	47	245	727	0.34	0.0568	0.0002	0.619	0.006	0.0790	0.0007	484	9	489	4	490	4
M24-6-9	52	280	791	0.35	0.0567	0.0004	0.621	0.017	0.0794	0.0020	480	26	491	10	493	12
M24-6-11	60	300	895	0.34	0.0566	0.0003	0.629	0.010	0.0805	0.0012	476	15	495	6	499	7
M24-6-12	53	256	772	0.33	0.0566	0.0003	0.629	0.012	0.0804	0.0014	478	19	495	7	499	9
M24-6-13	49	251	765	0.33	0.0560	0.0002	0.614	0.009	0.0795	0.0011	453	15	486	6	493	7
M24-6-14	39	181	655	0.28	0.0560	0.0003	0.614	0.009	0.0795	0.0012	453	15	486	6	493	7
M24-6-15	70	369	945	0.39	0.0574	0.0003	0.633	0.014	0.0802	0.0018	506	22	498	9	497	11
M24-6-16	35	173	536	0.32	0.0566	0.0003	0.630	0.010	0.0808	0.0013	477	17	496	7	501	8
M24-6-17	49	244	705	0.35	0.0571	0.0003	0.642	0.010	0.0816	0.0012	494	16	503	6	506	7
M24-6-18	48	239	732	0.33	0.0557	0.0003	0.608	0.008	0.0792	0.0011	442	14	482	5	491	6
M24-6-19	35	198	534	0.37	0.0556	0.0003	0.608	0.009	0.0793	0.0010	437	14	482	6	492	6
M24-6-20	32	132	549	0.24	0.0555	0.0003	0.620	0.007	0.0810	0.0007	432	11	490	4	502	4

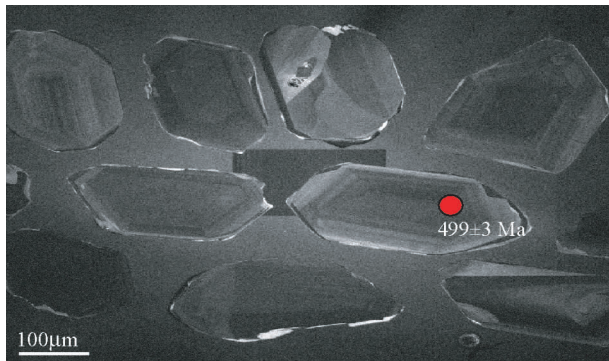


图4 混合岩中锆石的 CL 图像(岩浆成因的振荡环带)

Fig. 4 CL images of zircons in migmatite

品系与中-低级变质相伴的岩浆注入(混合岩化)形成的花岗岩,而不是原地变质、深熔作用所形成的浅色体。分选出的锆石具核和边结构,核部具岩浆环带特征,边很窄(图4)。锆石 LA-ICP-MS 年龄 $492.5 \pm 3.8\text{Ma}$ ($N = 20$, $\text{MSWD} = 2.5$) (表1、图5)。比该样品稍东的穆棱地区常兴村-新兴村剖面的片麻状浅色花岗岩(MDJ-62)获得了 $486 \pm 3\text{Ma}$ 的年龄(颜颀强等,2008),此片麻状花岗岩呈整合状(与区域片麻理大致平行)岩体侵入到常-新剖面麻山杂岩的中部。花岗岩的造岩矿物为石英、微斜长石、斜长石和云母,微量石榴子石。该片麻状花岗岩相当于二长花岗岩,早期斜长石具有钠长石净边结构。其中,斜长石大都发生了绿泥石化和绢云母化,云母以白云母居多,部分黑云母已绿泥石化。该年龄在误差范围内与本文结果一致,应代表了岩浆结晶的时代,即混合

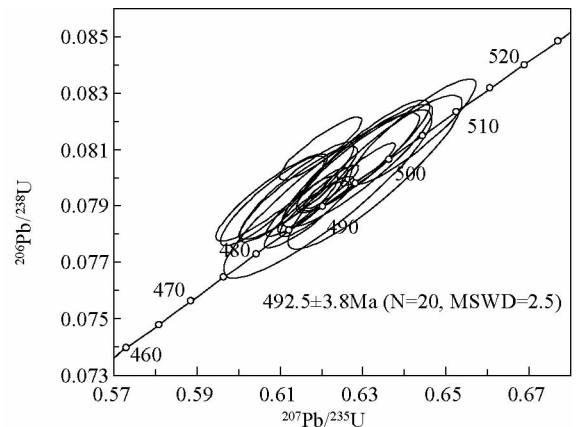


图5 混合岩中锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 5 Concordia diagram of LA-ICP-MS U-Pb data for zircon from migmatite (data-point error ellipses are 68.3% conf.)

岩化作用的时间。相邻的条带状混合岩中的锆石具有复杂的变质增生边(颜颀强等,2008),可能与注入混合岩化本身造成的变质作用有关,如黑云母向角闪石的转化(图3f)。更早期的变质作用在此样品没有记录。该混合岩与北部花岗岩质片麻岩穹窿(或兴东群)的变质地质特征非常一致,而与狭义麻粒岩相麻山群有重大差异。尽管如此,中级区与麻粒岩相部位在注入混合岩化方面是一致的,而且,前者也确实给出了早古生代花岗岩活动(吴福元等,1999; Wilde *et al.*, 2003; 刘建峰等,2008)和500Ma(晚泛非期)的中级变质事

件的证据(温泉波等,2008),这一变质年龄与注入混合岩化时期等同。因此,也不排除强烈注入混合岩化对先前麻粒岩相部位变质锆石年龄重启的可能性,500Ma可能反映了注入混合岩化作用的年代,该混合岩化作用在麻山杂岩中的影响广泛而强烈。麻粒岩相部位的退变和中级(角闪岩相)变质作用可能是注入混合岩化引起的,而不是变质、深熔引起大规模的混合岩化。即中级变质作用是注入混合岩化的结果,而不是混合岩化的原因。

7 混合岩和花岗岩的形成环境

混合岩和花岗岩岩石中往往有变质岩残留包体(图2b, c)及夕线石、石榴子石、堇青石、尖晶石等,这些矿物组合,似乎对应于S-型花岗岩,这种推断的前提是花岗岩源于变沉积岩的深熔改造,但是,根据前面的分析,大部分花岗岩的形成与本区的变质、深熔应分属不同的过程。据花岗岩的岩石化学、常量元素及部分微量元素特征(Wu *et al.*, 2000; 颧顽强等,2008)显示为S-型花岗岩,Sr-Nd同位素特征显示壳源花岗岩,但位于S-花岗岩右侧边缘、远离I-花岗岩:既不属于S-型花岗岩、又不属于I-型花岗岩,而Rb, Sr, Ba等元素的丰度特征与A-型花岗岩非常接近(Jung *et al.*, 1998b)。

上述复杂的残留矿物(组合)反映了这些岩石形成时并非单纯岩浆的性质,单纯依靠岩石化学很难真实反映花岗岩的成因性质。参照花岗岩的综合分类方案(Barbarin, 1999),据A/CNK > 1(颧顽强等,2008),显示CPG特征,但偶有角闪石、褐帘石、楣石,又显示KCG(K-rich and K-feldspar porphyritic calc-alkaline granitoids,即KCG-富钾及钾长石斑晶的钙碱性花岗岩类)的特征,其它综合性质也与KCG一致,属I-型花岗岩。

KCG形成于陆陆碰撞挤压之后的抬升过程(relaxation phases, Barbarin, 1999),出现于挤压向引张转化的过程中(Lameyre, 1988; Bonin, 1990),与陆-陆碰撞有关,尤其是当碰撞结束时容易形成。

与碰撞有关的花岗岩的产生有多种方式,如变沉积岩堆叠及与变形、流体的相互作用,此外,陆壳底部岩石圈的拆离也可产生特定地化性质的A-型花岗岩(Jung *et al.*, 1998b)。同时期热的地幔物质的上涌至下地壳可以解释麻粒岩相变质作用(Masberg *et al.*, 1992)和随后花岗岩的产生。在西非克拉通的东部边缘(如撒哈拉沙漠),KCG是泛非造山带最晚期的岩浆活动(如Boissonnas, 1980; Liégeois *et al.*, 1987),其时亦发生了挤压向拉张构造环境的转换。

鸡西麻粒岩相麻山杂岩中普遍发育混合岩和花岗岩,这一点与西南非洲的Damara中部造山带较为近似,Damara造山带具有多种花岗岩,尤其钾长斑晶花岗岩、石榴花岗岩,变质程度可能达角闪岩相,比鸡西麻山杂岩稍低;变质峰期年龄(独居石)511~517Ma, Oetmoed Granite岩体侵入年龄490~500Ma(Jung *et al.*, 2001)。但是两地的变质-混合岩-花岗

岩年龄关系有所区别,Damara造山带地壳熔融事件晚于变质峰期约30~40Ma(Jung *et al.*, 2001)。

更大尺度上,巴西东南部长达2000km的新元古代晚期岩浆弧的发育尤其引人注目(陆松年,2004)。在东冈瓦纳陆块内部发育广泛的麻粒岩相变质作用和随后的长英质岩浆活动(如Santosh and Drury, 1988),亦发育大量的新元古代花岗岩、甚至碱性岩类(Rajesh *et al.*, 1996)。南极普里兹带在广泛的低压麻粒岩相变质之后亦发育典型的钾长斑晶花岗岩、正长花岗岩(李森等,2007)。

8 讨论

如前所述,深熔作用所伴随的混合岩化在麻山杂岩内的分布是有限的,集中于鸡西、柳毛一带的麻山杂岩中,而注入式混合岩化是普遍的,可见于所有麻山杂岩的分布区。麻山杂岩中与深熔作用有所不同的岩浆注入混合岩化作用是本文特别注意到并强调的现象。

混合岩化作用中外来物质的影响,主要根据Sederholm(1934),强调来自深部的岩汁(ichor)在混合岩形成中的重要作用,并认为花岗岩浆的形成是源自深部岩浆的喷射(emanation)引起壳源花岗岩成分岩石的深熔所产生的。实际上,混合岩的形成未必需要所谓岩汁的作用,当岩浆注入过程中,岩石本身有一定的变形改造或破裂,岩浆沿裂隙注入与先存岩石共同构成混合岩。麻山杂岩中随处可见富钾长石的岩浆岩,整体处于张性环境、且体系富水。如前所述,早期麻粒岩相部分呈近东西向构造,而晚期混合岩化过程整体表现为南北向隆起(姜继圣,1992; 卢良兆等,1996),东北地区花岗岩显示自西向东趋于碱性的变化(吴福元等,1999),显示了晚期构造对早期构造叠加的可能性。另一方面,与混合岩化相对应的变质作用(如兴东群中的角闪岩相变质)可能显示了与岩浆注入有关的中地壳的接触变质效应,同时在高级变质岩中引起退变现象。所以,早期麻粒岩相变质与后期注入混合岩化作用应是相互独立的构造或热事件。

佳木斯地块以北的布列亚地块(Bureya)和东南部的兴凯地块(Khanka)中的花岗质片麻岩均具有~500Ma的年龄,兴凯地块具有与麻山杂岩完全一致的早期岩浆和晚期变质事件年代,是与佳木斯地块相互关联的统一地体(Wilde *et al.*, 2008; Zhou *et al.*, 2010)。在西伯利亚克拉通南部边缘,有长达超过1000km的构造带,经历了488Ma至478Ma期间的麻粒岩相变质作用,变质后产生 471 ± 2 Ma的正长岩(Salnikova *et al.*, 1998, 2001),这里正长花岗岩晚于变质年龄。

南极的普里兹带等则形成于碰撞带(Zhao *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2006)或陆内活动带(Yoshida *et al.*, 2003),这些部位均属于冈瓦纳古陆的内部。该带主期变质略早于同期的岩浆活动,在峰期变质之后的深熔作用形成花岗岩(Carson

et al., 1997), 鸡西麻山杂岩似乎相反, 先有花岗岩, 后发生变质 (Wilde et al., 2001, 2003), 按照变质作用发生时热的来源, 这种情况应该出现近等压冷却 (IBC) 的变质 *PTt* 轨迹, 而鸡西麻山杂岩的矿物组合和温压计算似乎显示为顺时针 *PTt* 轨迹 (姜继圣, 1992, 1996; 卢良兆等, 1996), 因此对麻山杂岩变质-岩浆的关系尤其是峰期变质发生的时代有必要进一步探讨。

冈瓦纳陆块泛非造山带变质地体的变质作用峰期年龄一般要比鸡西麻山杂岩变质事件老 50Ma, 这就不排除另外一种可能性: 类似于泛非事件是以冈瓦纳古陆为中心发生的构造-变质-岩浆活动, 萨拉伊尔运动、兴凯运动可能是以西伯利亚古陆为中心的活动, 只不过与冈瓦纳陆块泛非事件相比, 其规模略小、强度稍弱, 从而造成变质作用与岩浆活动的密切接触和联系。

非洲西南部的 Damara 带位于北部的 Congo 和南部的 Kalahari 克拉通之间 (Jung et al., 1998a), 埃及东部沙漠 Meatiq 杂岩则位于阿拉伯-努比亚地块上邻近撒哈拉克拉通之处, 它们后期的岩浆活动远年轻于缝合或碰撞时间, 相当于碰撞带的后续活动 (El-Wahed and Anbar, 2009)。

麻山杂岩的形成表明早古生代时期这里为活动带, 变质之后构造环境发生改变, 整体趋向于张性背景, 导致大量富钾花岗岩的侵位, 引发了广泛的注入式混合岩化作用。随着岩浆的侵位、逐渐固结, 甚或形成佳蒙地块的基底 (张兴洲等, 2008)。

9 结论

通过上面的论述, 可以得出如下认识和结论:

(1) 在麻山杂岩中出现高级作用、中级变质作用和普遍的混合岩化作用, 通过浅色脉体或花岗质脉体中的长石自形晶、斜长石周围的钠长石净边、黑云母向角闪石的转化等现象表明混合岩化作用主要表现为岩浆的注入, 而不仅是高级变质之后的深熔作用所致。花岗岩的形成主要是异地侵位而不是原地深熔所致。注入式混合岩化还引起了中级变质作用和高级区的退变质作用。

(2) 高级变质与相关的深熔作用所引起的混合岩化在区域上的分布是有限的, 集中于西麻山的麻山杂岩中, 而注入式混合岩化是普遍的, 在麻粒岩相和角闪岩相部位均可出现, 其产出可遍布所有麻山杂岩的出露区。

(3) 注入式混合岩化作用的时代为 500Ma; 早期麻粒岩相变质与后期混合岩化作用应是相互独立的构造或热事件; 中级变质作用是混合岩化的结果, 而不是混合岩化的原因。

(4) 与注入式混合岩相关的花岗岩虽然表现出一些 S 型花岗岩的特征, 但根据矿物组合、地化性质的综合分析, 更可能是富钾及钾长石斑晶的钙碱性花岗岩类, 属于 I 型花岗岩。出现于挤压向引张转化的过程中。

(5) 麻山杂岩的变质与混合岩化特征表明, 以西伯利亚

古陆为中心的南部边缘发生了与冈瓦纳陆块内泛非事件类似的构造活动, 只不过这里的规模略小, 在变质之后迅速发生了构造体系的转换, 而形成大量岩浆活动。

致谢 黑龙江省第六地质勘察院的王斌工程师在野外踏勘期间给予了大力帮助; 感谢审稿人对初稿提出的非常中肯的意见。

References

- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46: 605 – 626
- Bergantz GW. 1989. Underplating and partial melting: Implications for melt generation and extraction. *Science*, 254: 1093 – 1095
- Boissonnas J. 1980. Les granites à structures concentriques et quelques autres granites tardifs de la chaîne Pan-Africaine en Ahaggar (Sahara central Algérie). Thesis, B. R. G. M. Mem. H. S. 16, 662
- Bonin B. 1990. From orogenic to anorogenic settings: Evolution of granitoid suites after a major orogenesis. *Geol. J.*, 25: 261 – 270
- Brown M, Rushmer T and Sawyer EW. 1995. Introduction to Special Section: Mechanisms and consequences of melt segregation from crustal protoliths. *J. Geophys. Res.*, 100: 15551 – 15563
- Brown M. 2001. Orogeny, migmatites and leucogranites: A review. *Proceedings of the Indian Academy of Science*, 110: 313 – 336
- Brown M. 2007. Crustal melting and melt extraction, ascent and emplacement in orogens: Mechanisms and consequences. *Journal of the Geological Society*, 164: 709 – 730
- Carson CJ, Powell P, Wilson CJL and Dirks PHGM. 1997. Partial melting during tectonic exhumation of a granulite terrane: An example from the Larsemann Hills, East Antarctica. *Journal of Metamorphic Geology*, 15: 105 – 126
- Chinese Academy of Science Expedition in the Heilongjiang Reaches. 1963. *Geology of the Heilongjiang River Reaches and Adjacent Area*. Vol. 1. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Clemens JD and Vielzeuf D. 1987. Constraints on melting and magma production in the crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 86: 287 – 306
- Dang YS and Li DR. 1993. Discussion on the Precambrian geochronological problems of the Jiamusi block. *Journal of the Changchun College of Geology*, 23(3): 312 – 318 (in Chinese with English abstract)
- El-Wahed MA and Anbar MA. 2009. Synoblique convergent and extensional deformation and metamorphism in the Neoproterozoic rocks along Wadi Fatira shear zone, Northern Eastern Desert, Egypt. *Arabian Journal of Geosci.*, 2: 29 – 52
- Harris NBW and Inger S. 1992. Trace element modeling of pelite-derived granites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 110: 46 – 56
- Huppert HE and Sparks RSJ. 1988. The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust. *Journal of Petrology*, 29: 599 – 642
- Inger S and Harris N. 1993. Geochemical constraints on leucogranite magmatism in the Langtang Valley, Nepal Himalaya. *Journal of Petrology*, 34: 345 – 368
- Jiang JS. 1992. Peak regional metamorphism of the khondalite series of Mashan Group and its evolution. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 11: 97 – 108 (in Chinese with English abstract)
- Jiang JS. 1996. Formation and Evolution of the Khondalites in China: A Case Study of the Mashan Group. Changchun: Jilin Science and Technology Publishing House (in Chinese)
- Jung S, Mezger K, Masberg P, Hoffer E and Hoernes S. 1998a. Petrology of an intrusion-related high-grade migmatite: Implications for partial melting of metasedimentary rocks and leucosome-forming processes. *Journal of Metamorphic Geology*, 16: 425 – 445

- Jung S, Mezger K and Hoernes S. 1998b. Petrology and geochemistry of syn- to post-collisional metaluminous A-type granites; A major and trace element and Nd-Sr-Pb-O-isotope study from the Proterozoic Damara Belt, Namibia. *Lithos*, 45: 147 – 175
- Jung S, Mezger K and Hoernes S. 2001. Trace element and isotopic (Sr, Nd, Pb, O) arguments for a mid-crustal origin of Pan-African garnet-bearing S-type granites from the Damara orogen (Namibia). *Precambrian Research*, 110: 325 – 355
- Kriegsman LM. 2001. Partial melting, partial melt extraction and partial back reaction in anatexitic migmatites. *Lithos*, 56: 75 – 96
- Lameyre J. 1988. Granite settings and tectonics. *Rend. Soc. It. Mineral. Petrol.*, 43: 215 – 236
- Li DR and Dang YS. 1993. Reviews of the study history of Mashan Group at Jixi region, Heilongjiang Province. *Heilongjiang Geology*, 4(1): 1 – 9 (in Chinese with English abstract)
- Li M, Liu XC and Zhao Y. 2007. Zircon U-Pb ages and geochemistry of granitoids from Prydz Bay, East Antarctica, and their tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 1055 – 1066 (in Chinese with English abstract)
- Liégeois JP, Bertrand JM and Black R. 1987. The subduction and collision-related Pan-African composite batholith of the Adrar des Iforas (Mali): A review. *Geol. J.*, 22: 185 – 211
- Liu JF, Chi XG, Dong CY, Zhao Z, Li GR and Zhao YD. 2008. Discovery of Early Paleozoic granites in the eastern Lesser Hinggan Mountains, northeastern China and their tectonic significance. *Geological Bulletin of China*, 27(4): 534 – 544 (in Chinese with English abstract)
- Liu JL. 1988. Study on the Precambrian of the Jiamusi block. *Journal of the Changchun College of Geology*, 18(2): 147 – 156 (in Chinese with English abstract)
- Liu XC, Jahn B-M, Zhao Y, Li M, Li H and Liu XH. 2006. Late Pan-African granitoids from the Grove Mountains, East Antarctica: Age, origin and tectonic implications. *Precambrian Research*, 145: 131 – 154
- Lu LZ, Xu XC and Liu FL. 1996. The Early Precambrian Khondalites in Northern China. Changchun: Changchun Publishing House (in Chinese): 275
- Lu SN. 2004. Preliminary study on the “Pan-Cathaysian orogenesis” and the correlation of Caledonian and Pan-African orogenesis. *Geological Bulletin of China*, 23(9 – 10): 952 – 958 (in Chinese with English abstract)
- Masberg HP, Hoffer E and Hoernes S. 1992. Microfabrics indicating granulite-facies metamorphism in the low-pressure central Damara Orogen, Namibia. *Precambrian Research*, 55: 243 – 257
- Misch P. 1968. Plagioclase compositions and non-anatexitic origin of migmatite gneisses in Northern Cascade Mountains of Washington State. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 17: 1 – 70
- Mogk DW. 1992. Ductile shearing and migmatization at mid-crustal crustal levels in an Archean high grade gneiss belt, northern Gallatin Range, Montana, USA. *Journal of Metamorphic Geology*, 10: 427 – 438
- Patiño Douce AE, Humphreys ED and Johnston AD. 1990. Anatexis and metamorphism in tectonically thickened continental crust exemplified by the Sevier hinterland, western North America. *Earth and Planetary Science Letters*, 97: 290 – 315
- Patiño Douce AE and Harris N. 1998. Experimental constraints on Himalayan Anatexis. *Journal of Petrology*, 39: 689 – 710
- Patiño Douce AE. 1999. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? *Understanding Granites*. In: Castro A, Fernandez C and Vigneresse JL (eds.). *Integrating New and Classical Techniques Geol. Soc. Spec. Pub.*, 158: 55 – 75
- Peng CCJ. 1970. The intergranular albite in some granites and syenites of Hong Kong. *American Mineralogist*, 55: 270 – 282
- Rajesh HM, Santosh M and Yoshida M. 1996. The felsic magmatic province in East Gondwana; Implications for Pan-African tectonics. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 14: 275 – 291
- Salmikova EB, Sergeev SA, Kotov AB *et al.* 1998. U-Pb zircon dating of granulite metamorphism in the Sludyanskiy Complex, eastern Siberia. *Gondwana Research*, 1: 195 – 205
- Salmikova EB, Kozakov IK, Kotov AB *et al.* 2001. Age of Palaeozoic granites and metamorphism in the Tuvino-Mongolian Massif of the Central Asian Mobile Belt: Loss of a Precambrian microcontinent. *Precambrian Research*, 110: 143 – 164
- Santosh M and Drury SA. 1988. Alkali granites with Pan-African affinities from Kerala, South India. *Journal of Geological Society of India*, 27: 309 – 312
- Sederholm JJ. 1907. Om Granit och Gneis, deras uppkomst, uppträdande och utbredning inom urberget i Fennoscandia. *Bull. Comm. Géol. Finl.*, 23: 1 – 110
- Sederholm JJ. 1934. On migmatites and associated Precambrian rocks of southwest Finland. Part 3. The Aland Islands. *Bull. Comm. Geol. Finland*, 107: 1 – 68
- Song B, Li JY, Niu BG and Xu WX. 1997. Single-grain zircon ages and its implications in biotite-plagioclase gneiss in Mashan Group in the eastern Heilongjiang. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(3): 306 – 321 (in Chinese with English abstract)
- Tommasini S and Davies GR. 1997. Isotope disequilibrium during anatexis; A case study of contact melting, Sierra Nevada, California. *Earth and Planetary Science Letters*, 148: 273 – 285
- Vernon RH. 1988. Igneous microtextures in migmatites. *Geology*, 16: 1126 – 1129
- Vielzeuf D and Montel JM. 1994. Partial melting of metagreywackes. Part I. Fluid-absent experiments and phase relations. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 17: 375 – 393
- Wen QB, Liu YJ, Li WM, Han GQ and Ding L. 2008. Monazite ages and its geological significance of granitoid gneiss in the Jiamusi Massif. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 38(2): 187 – 193
- Whittington AG and Treloar PJ. 2002. Crustal anatexis and its relation to the exhumation of collisional orogenic belts, with particular reference to the Himalaya. *Mineralogical Magazine*, 66: 53 – 91
- Wilde SA, Dorsett-Bain HL and Lennon RG. 1999. Geological setting and controls on the development of graphite, sillimanite and phosphate mineralisation within the Jiamusi Massif: An exotic fragment of Gondwanaland located in North-Eastern China? In: Dissanayake CB (ed.). *Gondwana. Gondwana Research*, 2: 21 – 46
- Wilde SA, Zhang XZ and Wu FY. 2000. Extension of a newly-identified 500Ma metamorphic terrain in North East China; Further U-Pb SHRIMP dating of the Mashan Complex, Heilongjiang Province, China. *Tectonophysics*, 328: 115 – 130
- Wilde SA, Wu FY and Zhang XZ. 2001. The Mashan Complex: SHRIMP U-Pb zircon evidence for a Late Pan-African metamorphic event in NE China and its implication for global continent reconstructions. *Geochimica*, 30(1): 35 – 50 (in Chinese with English abstract)
- Wilde SA, Wu FY and Zhang XZ. 2003. Late Pan-African magmatism in northeastern China: SHRIMP U-Pb zircon evidence from granitoids in the Jiamusi Massif. *Precambrian Research*, 122: 311 – 327
- Wilde S, Wu FY, Zhao GC and Sklyarov E. 2008. The Jiamusi, Khanka and Bureya blocks: A contiguous crustal entity accreted to the Central Asian Orogenic Belt in the Early Jurassic? *Abstracts, 33rd IGC, Oslo*
- Wu CH. 1996. The Mashan Complex Group. *Paleoproterozoic of Chinese Stratigraphy*. Beijing: Geological Publishing House, 36 – 37 (in Chinese)
- Wu FY, Sun DY and Lin Q. 1999. Petrogenesis of the Phanerozoic granites and crustal growth in Northeast China. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 181 – 189 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Wilde SA and Sun DY. 2001. Zircon SHRIMP U-Pb ages of gneissic granites in Jiamusi massif, northeastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 443 – 452 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Yang JH, Lo CH, Wilde SA, Sun DY and Jahn BM. 2007. The Heilongjiang Group: A Jurassic accretionary complex in the Jiamusi

- Massif at the western Pacific margin of northeastern China. *Island Arc*, 16; 156–172
- Xie HQ, Miao LC, Chen FK, Zhang FQ and Liu DY. 2008. Characteristics of the “Mashan Group” and zircon SHRIMP U-Pb dating of granite in Muling area, southeastern Heilongjiang Province, China; Constraint on crustal evolution of the southernmost of Jiamusi Massif. *Geological Bulletin of China*, 27(12): 2127–2137 (in Chinese with English abstract)
- Yoshida M, Jacobs J, Santosh M and Rajesh HM. 2003. Role of Pan-African events in the Circum-East Antarctic Orogen of East Gondwana: A critical overview. In: Yoshida M, Windley B and Dasgupta S (eds.). *Proterozoic East Gondwana: Supercontinent Assembly and Breakup*. Geological Society of London, Special Publications, 206; 57–75
- Zeck HP. 1970. An erupted migmatite from Cerro de Hoyazo, S. E. Spain. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 26; 225–246
- Zeng LS, Asimow P and Saleeby JB. 2005. Coupling of anatectic reactions and dissolution of accessory phases and the Sr and Nd isotope systematics of anatectic melts from a metasedimentary source. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69: 3671–3682
- Zhang XZ, Zhou JB, Chi XG, Wang CW and Hu DQ. 2008. Late Paleozoic Tectonic-sedimentation and petroleum resources in northeastern China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 38(5): 719–725 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Y, Liu XH, Liu XC and Song B. 2003. Pan-African events in Prydz Bay, East Antarctica and its inference on East Gondwana tectonics. In: Yoshida M, Windley B and Dasgupta S (eds.). *Proterozoic East Gondwana: Supercontinent Assembly and Breakup*. Geological Society of London, Special Publications, 206; 231–245
- Zhou JB, Wilde AS, Zhao GC, Zhang XZ, Zheng CQ, Wang H and Zeng WS. 2010. Pan-African metamorphic and magmatic rocks of the Khanka Massif, NE China; Further evidence regarding their affinity. *Geological Magazine*, Published online by Cambridge University Press 10 Feb 2010 doi:10.1017/S0016756810000063
- 附中文参考文献**
- Wilde SA, 吴福元, 张兴洲. 2001. 中国东北麻山杂岩晚泛非期变质的锆石 SHRIMP 年龄证据及全球大陆再造意义. *地球化学*, 30(1): 35–50
- 党延松, 李德荣. 1993. 佳木斯地块前寒武纪同位素地质年代学问题的讨论. *长春地质学院学报*, 23(3): 312–318
- 黑龙江省地质矿产局. 1993. 黑龙江省区域地质志. 中华人民共和国地质矿产部地质专报(一), 区域地质, 第33号. 北京: 地质出版社
- 姜继圣. 1992. 麻山群孔兹岩系主期区域变质作用及演化. *岩石矿物学杂志*, 11: 97–108
- 姜继圣. 1996. 中国孔兹岩的形成及演化——以麻山群为例. 长春: 吉林科学技术出版社, 1–195
- 李德荣, 党延松. 1993. 黑龙江省鸡西地区麻山群研究历史及其评述. *黑龙江地质*, 4(1): 1–9
- 李森, 刘晓春, 赵越. 2007. 东南极普里兹湾地区花岗岩类的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义. *岩石学报*, 23(5): 1055–1066
- 刘建峰, 迟效国, 董春艳, 赵芝, 黎广荣, 赵院冬. 2008. 小兴安岭东部早古生代花岗岩的发现及其构造意义. *地质通报*, 27(4): 534–544
- 刘静兰. 1988. 佳木斯中间地块前寒武纪地质研究. *长春地质学院学报*, 18(2): 147–156
- 卢良兆, 徐学纯, 刘福来. 1996. 中国北方早前寒武纪孔兹岩系. 长春: 长春出版社, 1–275
- 陆松年. 2004. 初论“泛华夏造山作用”与加里东和泛非造山作用的对比. *地质通报*, 23(9–10): 952–958
- 宋彪, 李锦轶, 牛宝贵, 徐文喜. 1997. 黑龙江省东部麻山群黑云斜长片麻岩中锆石的年龄及其地质意义. *地球学报*, 18(3): 306–321
- 温泉波, 刘永江, 李伟民, 韩国卿, 丁凌. 2008. 佳木斯地块花岗质片麻岩的独居石年龄及其地质意义. *吉林大学学报(地球科学版)*, 38(2): 187–193
- 吴昌华. 1996. 麻山岩群. 见:《中国地层典》编委会编. 中国地层典——古元古界. 北京: 地质出版社, 36–37
- 吴福元, 孙德有, 林强. 1999. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生. *岩石学报*, 15(2): 181–189
- 吴福元, Wilde SA, 孙德有. 2001. 佳木斯地块片麻状花岗岩的锆石离子探针 U-Pb 年龄. *岩石学报*, 17(3): 443–452
- 颜颖强, 苗来成, 陈福坤, 张福勤, 刘敦一. 2008. 黑龙江东南部穆棱地区“麻山群”的特征及花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年——对佳木斯地块最南缘地壳演化的制约. *地质通报*, 27(12): 2127–2137
- 张兴洲, 周建波, 迟效国, 王成文, 胡大千. 2008. 东北地区晚古生代构造-沉积特征与油气资源. *吉林大学学报(地球科学版)*, 38(5): 719–725
- 中国科学院黑龙江流域综合考察队. 1963. 黑龙江流域及其毗邻地区地质(第一卷). 北京: 科学出版社