

依兰地区黑龙江增生杂岩碱性玄武质火山碎屑岩中钠质闪石特征及成因探讨

宋海峰^{1,2}, 徐仲元², 刘正宏², 王跃³

(1. 长春工程学院, 吉林 长春 130021; 2. 吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061;
3. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037)

摘要: 佳木斯地块西侧依兰地区出露一套洋岛型碱性玄武质火山碎屑岩, 它由岩屑和细粒火山碎屑物组成。火山碎屑岩在佳木斯地块与松嫩地块之间的古洋盆闭合过程中, 发生了低温高压变质作用, 在岩石中形成了大量钠质闪石。其中岩屑中的钠质闪石不定向均匀分布, 普遍具有环带结构, 核部为青铝闪石, 边部为蓝闪石; 细粒火山碎屑物中的钠质闪石定向分布, 均为青铝闪石。这些钠质闪石形成的温压条件相似, 形成温度在 300 ~ 350°C 之间, 形成压力在 0.7 GPa 左右。根据岩屑和细粒火山碎屑物的矿物成分、钠质闪石的结构构造特征以及火山碎屑岩的变形特征, 推测这类岩石在低温高压变质作用过程中钠质闪石形成的首要条件是有足够的钠质来源; 在有足够钠质来源的前提下, 形成钠质闪石的种类与体系的氧逸度有着直接关系, 低氧逸度条件下形成蓝闪石, 高氧逸度条件下形成青铝闪石。这些钠质闪石的形成与佳木斯地块、松嫩地块的拼合碰撞以及之后岩石的变形方式有关。

关键词: 钠质闪石; 高压变质带; 黑龙江增生杂岩; 依兰地区

中图分类号: P578.955; P588.21⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2009)02-0129-06

Characteristics and genesis of sodium amphiboles in alkaline basaltic pyroclastic debris of Heilongjiang accretionary complexes in Yilan area

SONG Hai-feng^{1,2}, XU Zhong-yuan², LIU Zheng-hong² and WANG Yue³

(1. Changchun Institute of Technology, Changchun 130021, China; 2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China; 3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: There is a set of oceanic island type alkaline basaltic pyroclastic rocks composed of debris and fine-grained pyroclastic materials in western Jiamusi terrain, Yilan area. These rocks resulted from low temperature and high pressure metamorphism during the closure process of the ancient oceanic basin between Jiamusi terrain and Songnen terrain, and formed a large number of sodium amphiboles in them. The sodium amphiboles in pyroclastic debris are distributed uniformly and non-directionally, and generally show zonal structure. The core is mainly crossite and the edge part is glaucophane. The sodium amphiboles in fine-grained pyroclastic materials are distributed directionally, composed exclusively of crossite. Temperature and pressure conditions for the formation of these sodium amphiboles are quite similar, with temperature between 300 and 350°C and pressure about 0.7 GPa. Based on mineral composition of pyroclastic debris and fine-grained pyroclastic debris, structure characteristics of sodium amphiboles and deformation characteristics of pyroclastic debris, it is inferred that the primary conditions for the formation of sodium amphiboles are low temperature and high pressure metamorphism and sufficient sodium source. Under the condition of sufficient sodium source, the kinds of sodium amphiboles have a direct relationship with oxygen fugacity in the system. Glaucophane and crossite were formed

under low oxygen fugacity and high oxygen fugacity respectively. The formation of these sodium amphiboles is related to the collision between Jiamusi terrain and Songnen terrain and also to the later deformation style of rocks.

Key words: sodium amphiboles; high-pressure metamorphic belt; Heilongjiang accretionary complexes; Yilan area

佳木斯地块位于兴蒙造山带东段,处于华北板块、西伯利亚板块和太平洋板块所夹持地区。它的西侧为松嫩地块,以牡丹江断裂为界;东侧为完达山地块,以同江-当壁断裂为界;北侧为布列亚地块,以佳-依断裂为界;南侧为兴凯地块,以敦-密断裂为界(赵春荆等,1996)。佳木斯地块的变质杂岩主要由麻山群、兴东群和原黑龙江群组成(黑龙江省地质矿产局,1993),原黑龙江群主要分布于佳木斯地块的西侧和南侧,对原黑龙江群的构造属性争议较大(徐公愉等,1986;刘静兰,1988;曹熹等,1992;张兴洲,1992;黑龙江省地质矿产局,1993;赵春荆等,1996;李锦轶等,1999)。自上个世纪在原黑龙江群中陆续发现了蓝片岩,许多研究者对蓝片岩中的钠质闪石进行了研究(白景文等,1988;张兴洲等,1991;张兴洲,1992;曹熹等,1992;周裕文等,1994;叶惠文等,1994;李锦轶等,1999),将其解释为地块拼贴作用产物,根据这一特征以及在原黑龙江群中发现含放射虫化石的硅质岩(张兴洲,1992)、含几丁虫化石的千枚岩(李锦轶等,1999)和原黑龙江群岩石组合特征,确定原黑龙江群(或其一部分)为佳木斯地块与松嫩地块拼贴过程中形成的一套增生杂岩。最近在佳木斯地块西侧依兰地区该增生杂岩带内,发现了一套由“轴外火山作用”形成的碱性玄武质火山碎屑岩(宋海峰等,2008),这类岩石普遍含有钠质闪石,是火山碎屑岩中重要组成矿物之一。通过对碱性玄武质火山碎屑岩中钠质闪石的研究,可以确定它们形成时的环境及后期演变过程,为查明该地区的地质演化历史提供依据。本文以依兰地区碱性玄武质火山碎屑岩中的钠质闪石为研究对象,通过对其岩相学和地球化学特征的分析,讨论了碱性玄武质火山碎屑岩中钠质闪石的种类、形成条件以及它们在地质演化过程中的变化规律。

1 黑龙江增生杂岩特征

依兰地区的黑龙江增生杂岩整体上呈南北向带状分布,面理为北东向。它由基质和岩块两部分组成,二者之间为断层接触。基质为长英质片岩,占杂岩的70%左右,为一套活动大陆边缘的沉积岩系

(曹熹等,1992;张兴洲,1992);岩块包括超基性岩与变质辉长岩岩块、变质火山岩岩块和大理岩岩块,它们分布于长英质片岩之中,占杂岩的30%左右,这些岩块的长轴方向与面理方向一致(图1),为一套肢解的蛇绿岩岩套岩石组合(曹熹等,1992;张兴洲,1992)。

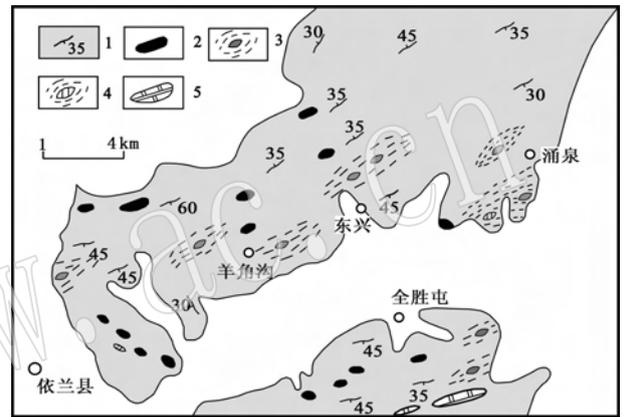


图1 依兰地区黑龙江增生杂岩分布特征

Fig. 1 Distribution of Heilongjiang accretionary complexes in Yilan area

1—长英质片岩及产状;2—超基性岩与变质辉长岩;3—变质火山熔岩及绿色片岩;4—变质火山碎屑岩及绿色片岩;5—大理岩

1—felsic schist and its attitude; 2—ultrabasic rocks and metamorphosed gabbro; 3—metamorphic volcanic lava and greenschist; 4—metamorphosed volcaniclastic rocks and greenschist; 5—marble

依兰地区的超基性岩和变质辉长岩在杂岩中断续分布,其中超基性岩岩块的岩石类型有橄榄岩、二辉橄榄岩、斜辉橄榄岩和辉石岩等,它们普遍遭受了变质变形作用改造,以及强烈的蛇纹石化作用;变质辉长岩主要由粗晶透辉石和斜长石组成,斜长石普遍钠黝帘石化。

变质火山岩包括变质火山熔岩和火山碎屑岩,其中变质火山熔岩出露较多,在杂岩中断续分布,夹于蓝片岩或绿片岩中。变质火山熔岩具有枕状构造,枕状体成群出现,大小不等,原岩特征保留较好,保留变余枕状构造和气孔状构造,但多数已经发生变形,明显拉长(曹熹等,1992;张兴洲,1992)。此外,在依兰涌泉南西大架子山附近出露一套由“轴外火山作用”形成的碱性玄武质火山碎屑岩(宋海峰

等,2008),它呈透镜状残存于绿片岩中,与绿片岩为渐变过渡关系。火山碎屑岩呈浅灰色,碎屑物分选差,成分和结构、构造变化大,缺乏稳定的层理。它由两部分组成,一部分为塑性-半塑性岩屑,变形极弱,原始特征保留较好,含量大于70%;另一部分为细粒的火山碎屑,含量小于30%,普遍发生了强烈变形,产状变化较大。

大理岩岩石类型分为两类(图1):一类主要分布于依兰县以东,为石墨大理岩、透辉石大理岩和白云岩,这类大理岩可能是由于后期构造作用导致麻山群岩石混杂于增生杂岩内(曹熹等,1992;张兴洲,1992);另一类大理岩主要分布于全胜屯以南,呈薄层状或不连续的扁豆状与绿片岩互层状产出,这类大理岩普遍含有镁钠闪石,其成因有待进一步研究。

2 火山碎屑岩中钠质闪石特征

火山碎屑岩由岩屑和细粒火山碎屑物组成,它们的矿物组成相似,均由钠质闪石、钠长石、绿帘石及少量阳起石和绿泥石组成,但二者在结构、构造上差别较大,岩屑具有的粗粒变晶结构、块状构造与细粒火山碎屑物具有的细粒鳞片变晶结构、片状构造显著不同。镜下观察表明,在这类岩石中钠质闪石的结构构造及光学性质存在较大差别。

岩屑中含有大量的钠质闪石,含量为30%~35%,粒度多数在0.1 mm×0.5 mm,最大0.2 mm×1.5 mm,自形程度较高,不定向均匀分布,钠质闪石中含有绿帘石包体且多具环带结构。在一个颗粒较大的钠质闪石中残留若干个颜色较深的钠质闪石,它们断续相连,色调较深的钠质闪石边界呈锯齿状,多色性较强,Ng为深紫色-紫色、Nm为深蓝-蓝紫色、Np为亮黄-浅黄-浅褐黄色,负延性;色调较浅的钠质闪石包裹若干个色调较深的钠质闪石,它们的多色性较弱,Ng为浅蓝-天蓝、Nm为淡紫-浅蓝紫、Np为无色-浅黄色,正延性。钠长石30%~35%,他形,多呈团块状充填于蓝闪石和绿帘石的空隙中,边界呈锯齿状,粒度多数在0.3 mm×0.5 mm,内部含有细小的钠质闪石和绿帘石包体;绿帘石含量为30%~40%,半自形;岩屑中含有少量阳起石和绿泥石(图2a)。

细粒火山碎屑物中矿物粒度明显小于岩屑中矿物粒度,并且在细粒火山碎屑物中含有和岩屑矿物组成、结构构造特征相似的细小岩屑。细粒火山碎屑物中钠质闪石含量30%~35%,定向排列,不具环带结构,色调较深,多色性较强,Ng为深紫色-紫色、Nm为深蓝-蓝紫色、Np为亮黄-浅黄-浅褐黄色,负延性;钠长石含量极少,小于5%,多分布于细小岩屑中;绿帘石50%~60%,多呈条带状分布;含有少量阳起石和绿泥石(图2b)。

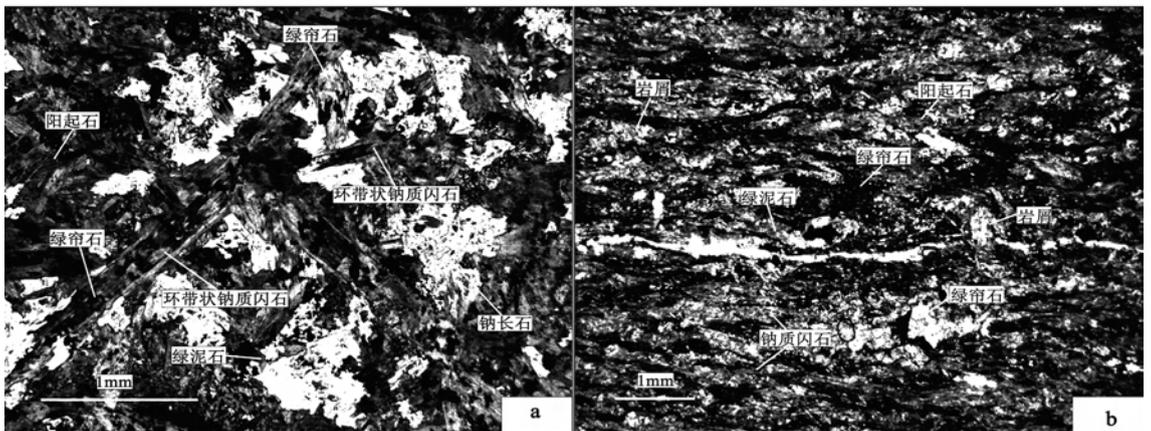


图2 火山碎屑岩岩屑(a)与细粒火山碎屑物(b)的显微特征(单偏光)

Fig. 2 Micro-characteristics of pyroclastic debris (a) and fine-grained volcanic debris (b) (plane polarized light)

3 钠质闪石的种类及温压条件估算

3.1 矿物化学分析

为了进一步确定该类岩石中钠质闪石的种类以

及它们形成的温压条件,对钠质闪石进行了电子探针分析。分析由中国科学院地质与地球物理研究所电子探针实验室完成,仪器型号为CAMECA, SX51,工作条件为加速电压15 kV,电子束流20 nA,并按23个氧、13个阳离子重新计算,探针分析数据及重

新计算的阳离子数列于表1。

按 Leake (1978) 分类, 火山碎屑岩中的钠质闪石分为蓝闪石和青铝闪石。岩屑环带状钠质闪石中色调较深、呈残留状的部分为青铝闪石, 色调较浅、多色性较弱的部分为蓝闪石; 细粒火山碎屑物中的钠质闪石均为青铝闪石 (图 3a)。

3.2 钠质闪石形成的温压条件估算

理想蓝闪石出现的反应温压条件为 200℃、0.5 GPa 和 350℃、0.7 GPa (Winkler, 1976)。在火山碎屑岩的岩屑和细粒火山碎屑物中均含有钠质闪石、阳起石、绿帘石和绿泥石, 并且钠质闪石和阳起石呈现平衡共生关系, 说明它们共同经历了绿片岩相变质

作用。根据蓝闪石和阳起石的共生关系, 蓝闪石形成的最高温度可达 500 ~ 550℃ (Smelik and Veblen, 1972)。Liou 和 Maruyama (1987) 的研究表明, 当压力升高到一定程度, 蓝闪石与阳起石反应形成蓝透闪石, 其温压范围大致为 300 ~ 350℃, 0.8 ~ 0.9 GPa, 而本类岩石中未出现蓝透闪石, 说明其压力不会超过 0.8 ~ 0.9 GPa。

Brown (1975) 利用 Na (B) 和 Al (T) 的含量推测角闪石在高压变质时的压力变化趋势, 推导出 Na (M4) 的含量与压力成正比。从 Na (B) - Al (T) 变异图解 (图 3b) 中可以看出, 本区蓝闪石和青铝闪石形成的压力差别不大, 均在 0.7 GPa 左右。

表1 火山碎屑岩中钠质闪石电子探针分析数据
Table 1 EPMA data of sodium amphiboles in pyroclastic debris

$w_B/\%$

矿物 序号 样号 位置	青铝闪石							蓝闪石			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	YQ5-21	YQ5-22	YQ5-23	YQ5-24	YQ5-25	YQ5-26	YQ5-27	YQ5-21-1	YQ5-22-1	YQ5-23-1	YQ5-24-1
	A	A	A	A	B	B	B	C	C	C	C
SiO ₂	55.31	55.01	55.48	55.10	55.01	55.32	55.45	56.78	56.40	56.38	55.48
TiO ₂	0.01	0.05	0.07	0.05	0.05	0.07	0.05	0.00	0.32	0.29	0.07
Al ₂ O ₃	7.46	8.76	7.79	7.68	8.76	8.10	7.72	8.86	9.02	8.78	8.79
Cr ₂ O ₃	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.24	0.00	0.03	0.07
FeO	17.84	15.16	17.45	17.30	15.16	17.21	17.90	14.83	15.21	15.18	16.45
MnO	0.23	0.24	0.28	0.24	0.24	0.28	0.25	0.15	0.17	0.16	0.18
MgO	8.31	9.03	7.92	8.21	9.03	8.11	8.24	8.35	8.79	8.72	7.85
CaO	0.85	1.62	0.83	0.57	1.62	1.28	0.78	0.45	1.61	1.71	0.83
Na ₂ O	6.19	6.38	6.15	6.73	6.38	5.82	6.29	7.06	6.46	6.38	7.15
K ₂ O	0.04	0.12	0.03	0.18	0.12	0.26	0.06	0.02	0.13	0.08	0.03
Total	96.28	96.37	96.00	96.06	96.37	96.45	96.74	97.74	98.11	97.71	96.90
计算基础: 23 个氧, 13 个阳离子											
T-Si	7.85	7.80	7.90	7.86	7.80	7.85	7.83	7.92	7.86	7.90	7.88
T-Al	0.15	0.20	0.10	0.14	0.20	0.15	0.17	0.08	0.14	0.10	0.12
SumT	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
C-Al	1.09	1.26	1.20	1.15	1.26	1.20	1.12	1.38	1.35	1.35	1.35
C-Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	0.01
C-Fe ³⁺	1.09	0.66	0.93	0.90	0.66	0.90	1.07	0.51	0.47	0.43	0.53
C-Ti	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.03	0.03	0.01
C-Mg	1.76	1.91	1.68	1.75	1.91	1.72	1.74	1.74	1.83	1.82	1.66
C-Fe ²⁺	1.03	1.13	1.15	1.16	1.13	1.14	1.04	1.22	1.30	1.35	1.43
C-Mn	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
C-Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SumC	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
B-Ca	0.13	0.25	0.13	0.09	0.25	0.20	0.12	0.07	0.24	0.26	0.13
B-Na	1.70	1.75	1.70	1.86	1.75	1.60	1.72	1.91	1.75	1.73	1.87
SumB	1.83	2	1.82	1.95	2	1.8	1.84	1.98	1.99	1.99	2
A-Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10
A-K	0.01	0.02	0.01	0.03	0.02	0.05	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01
SumA	0.01	0.02	0.01	0.03	0.02	0.05	0.01	0.00	0.02	0.01	0.10

注: A—岩屑中色调深的钠质闪石; B—细粒火山碎屑物中钠质闪石; C—岩屑中色调浅的钠质闪石。

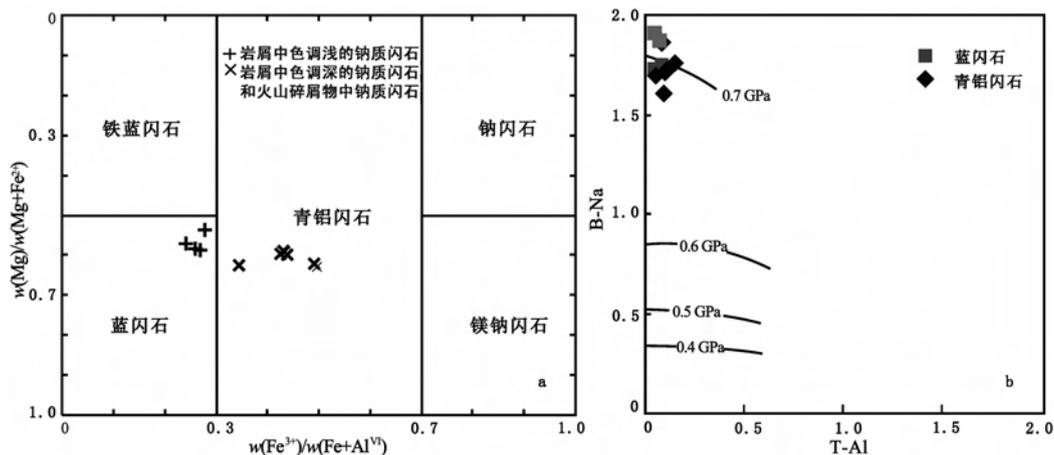


图3 火山碎屑岩中钠质闪石的分类(a,据 Leake,1978)与 Na(B)-Al(T) 变异图解(b)

Fig. 3 Classification of sodium amphiboles in pyroclastic debris (a, after Leake, 1978) and Na(B)-Al(T) variation diagram (b)

综合分析,推测本区钠质闪石的形成温度在 300 ~ 350°C 之间,形成压力在 0.7 GPa 左右。

4 钠质闪石的成因探讨

研究区处于佳木斯地块与松嫩地块拼合带上,已有研究表明这类碱性玄武质火山碎屑岩形成于洋岛环境,属轴外火山作用的产物,为蛇绿岩的上覆岩系(宋海峰等,2008)。当在佳木斯地块、松嫩地块之间的古洋盆闭合过程中,由于洋岛是海底的正地形,洋岛型火山碎屑岩被刮削下来得以保存,它们经历了低温、高压变质作用。

岩屑中的钠质闪石粒度明显大于细粒火山碎屑物中的钠质闪石,粒度差别极大。岩屑中含有大量钠长石,而细粒火山碎屑物中钠长石含量极少,说明岩屑可提供足够的钠质。岩屑和细粒火山碎屑物中钠质闪石粒度存在明显差别,这可能与钠质闪石在形成过程中钠质的供给量有关。这些钠质的来源一种可能是与岩石成分有关;再者可能与变质变形过程中外部钠质的带入有关。

火山碎屑岩岩屑中的钠质闪石具环带结构,其核部为呈残留状的青铝闪石,边部为蓝闪石。这个现象说明佳木斯地块与松嫩地块之间的古洋盆闭合过程中,洋岛型火山碎屑岩中的岩屑在早期低温高压变质作用过程中形成的矿物是青铝闪石,后期由于环境发生变化青铝闪石转变为蓝闪石。

洋壳的平均束缚水含量为 1% ~ 2%,最高可达 6%,这些水多数赋存在洋壳的含水矿物中(Peacock, 1990),在高压超高压变质作用中所涉及的变质反应

常常是脱水反应(张泽明等,1998)。碱性玄武质火山碎屑岩形成于大洋板内热点,因此它们也含有大量的水分。当佳木斯地块与松嫩地块之间的古洋盆闭合、这些岩石经历低温高压变质作用过程中,岩石中的含水矿物通过脱水反应将所含水分排出,在脱水过程中,岩屑处于高氧逸度环境。在岩石脱水结束以及发生变形过程中,由于岩屑的刚性程度相对于细粒火山碎屑物较大以及变质流体的缓冲效应,岩屑未发生变形,它处于一种相对封闭的环境,氧逸度较低。根据钠质闪石的结构特征以及火山碎屑岩的变形特征推断,岩屑中早期低温高压变质作用形成的矿物为青铝闪石,它们是在高氧逸度条件下形成的,后期氧逸度降低,青铝闪石转变为蓝闪石,未发生转变的青铝闪石呈残留状保存在蓝闪石中;而细粒火山碎屑物在两地块碰撞、发生低温高压变质作用的初期就发生了强烈变形而转变为开放体系,始终处于高氧逸度环境,因此推断细粒火山碎屑物中的青铝闪石是在高氧逸度条件下形成的。

通过上述分析,说明这些钠质闪石的形成与佳木斯地块、松嫩地块的拼合碰撞以及之后岩石的变形方式有关。洋岛型火山碎屑岩在经历低温高压变质作用过程中,能否形成钠质闪石,与钠质的供给量有关;在有足够钠质供给的前提下,形成钠质闪石的种类与体系的氧逸度有着直接的关系。高氧逸度条件下形成青铝闪石,低氧逸度条件下形成蓝闪石。对蓝闪石和青铝闪石形成的温压条件分析,蓝闪石和青铝闪石形成的温压条件基本一致,均在低温高压变质环境中形成。

References

- Bai Jingwen, Wang Wenxing, Zhang Hairi, *et al.* 1988. Character of glaucophane schists in metamorphic zone in Yilan, Mudangjiang, Heilongjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 7(4): 298 ~ 308 (in Chinese).
- Brown E H. 1975. The crossite content of Ca-amphibolites as a guide to pressure of metamorphism[J]. *Journal of Petrology*, 18 (1): 53 ~ 72.
- Cao Xi, Dang Zengxin, Zhang Xingzhou, *et al.* 1992. Jamusi Complex Terrain[M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 45 ~ 126 (in Chinese).
- Geologic Bureau and Mineral Resources of Heilongjiang Province. 1993. Regional Geology of Heilongjiang Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 8 ~ 43 (in Chinese).
- Leake B E. 1978. Nom enclature of amphiboles[J]. *American Mineralogist*, 63: 1 023 ~ 1 053.
- Li Jinyi, Niu Baogui, Song Biao, *et al.* 1999. Crustal Formation and Evolution of Northern Changbai Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House, 46 ~ 49 (in Chinese).
- Liu Jinglan. 1988. Geological study of Jamusi terrane of Precambrian[J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 2(18): 147 ~ 156 (in Chinese).
- Liou J G and Maruyama S. 1987. Parageneses and compositions of amphiboles from Franciscan jadeite-glaucophane type facies series metabasites at Cazadero, California[J]. *Geology*, 5: 371 ~ 395.
- Peacock S M. 1990. Fluid processes in subduction zones[J]. *Science*, 48: 329 ~ 337.
- Smelik E A and Veblen D R. 1992. Exsolution of Ca-amphibole from glaucophane and the miscibility gap between sodic and calcic amphibole[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 112: 178 ~ 195.
- Song Haifeng, Liu Zhenghong, Xu Zhongyuan, *et al.* 2008. The found of alkaline basaltic pyroclastic rock of Original Heilongjiang Group in Yilan area and its geodynamical meaning[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(3): 199 ~ 205 (in Chinese with English abstract).
- Winkler H G F. 1976. Petrogenesis of Metamorphic Rocks[M]. New York: Springer-Verlag, 334.
- Xu Gongyu and Fang Wenchang. 1986. Origin and evolution of the Jiamusi massif[J]. *Geology of Jilin*, (2): 31 ~ 38 (in Chinese).
- Ye Huiwen and Zhang Xingzhou. 1994. The Texture and evolution of Maushouli-Suifenhe lithosphere-study based on features of blueschist and ophiolites[A]. M-SGT Geology Studying Team. Geological Study on the Lithosphere Structure and its Evolution in Manzhouli-Suifenhe Geoscience Transect of China[C]. Beijing: Earthquake Publishing House, 73 ~ 83 (in Chinese).
- Zhang Xingzhou. 1992. Early collision history of Jamusi terrain—structure of Heilongjiang mélange-petrologic evidences[D]. Doctor's degree papers of Changchun Geology College. Changchun: Jilin University (in Chinese).
- Zhang Xingzhou and Zhang Yuanhou. 1991. Coexistence of blueschist and greenschist—New evidence for tectonic evolution of the longjiang suites[J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 21 (3): 277 ~ 282 (in Chinese).
- Zhang Zeming and Han Yuqing. 1988. Fluid-melt-rock interaction in the high-pre-ssure and ultra-high-pressure metamorphism[J]. *Geological Science and Technology Information*, 17(3): 24 ~ 30 (in Chinese).
- Zhao Chunjing, Peng Yujing, Dang Zengxin, *et al.* 1996. Tectonic Framework and Crust Evolution of Eastern Jilin and Heilongjiang Province[M]. Shenyang: Liaoning University Press, 36 ~ 66 (in Chinese).
- Zhou Yuwen and Yu Chuliang. 1994. Characteristics and tectonic environment of bearing-glaucophane metamorphic complex in Mudangjiang Region [A]. M-SGT Geology Studying Team. Geological Study on the Lithosphere Structure and Its Evolution in Manzhouli-Suifenhe Geoscience Transect of China[C]. Beijing: Earthquake Publishing House, 58 ~ 72 (in Chinese).

附中文参考文献

- 白景文, 王文兴, 张海驹, 等. 1988. 黑龙江依兰、牡丹江变质带蓝闪片岩特征[J]. *岩石矿物学杂志*, 7(4): 298 ~ 308.
- 曹熹, 党增欣, 张兴洲, 等. 1992. 佳木斯复合地体[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 45 ~ 126.
- 黑龙江省地质矿产局. 1993. 黑龙江省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 8 ~ 43.
- 李锦轶, 牛宝贵, 宋彪, 等. 1999. 长白山北段地壳的形成与演化[M]. 北京: 地质出版社, 46 ~ 49.
- 刘静兰. 1988. 佳木斯中间地块前寒武纪地质研究[J]. *长春地质学院学报*, 2(18): 147 ~ 156.
- 宋海峰, 刘正宏, 徐仲元, 等. 2008. 依兰地区原黑龙江群碱性玄武质火山碎屑岩的发现及地球动力学意义探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 27(3): 199 ~ 205.
- 徐公榆, 方文昌. 1986. 佳木斯中间地块的由来与发展[J]. *吉林地质*, (2): 31 ~ 38.
- 叶惠文, 张兴洲. 1994. 从蓝片岩及蛇绿岩特点看满洲里-绥芬河断面岩石圈结构演化[A]. M-SGT 地质课题组. 中国满洲里-绥芬河地学断面域内岩石圈结构及其演化的地质研究[C]. 北京: 地质出版社, 73 ~ 83.
- 张兴洲. 1992. 佳木斯地体的早期碰撞史——黑龙江岩系的构造-岩石学证据[D]. 长春: 吉林大学.
- 张兴洲, 张元厚. 1991. 蓝片岩与绿片岩共存: 龙江岩系构造演化的新证据[J]. *长春地质学院学报*, 21(3): 277 ~ 282.
- 张泽明, 韩郁箭. 1998. 高压超高压变质作用中流体-熔体-岩石相互作用[J]. *地质科技情报*, 17(3): 24 ~ 30.
- 赵春荆, 彭玉鲸, 党增欣, 等. 1996. 吉黑东部构造格架及地壳演化[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 36 ~ 66.
- 周裕文, 虞初良. 1994. 牡丹江地区含蓝闪石变质杂岩的特征及构造环境[A]. M-SGT 地质课题组. 中国满洲里-绥芬河地学断面域内岩石圈结构及其演化的地质研究[C]. 北京: 地震出版社, 58 ~ 72.