

# 黑龙江杂岩蓝片岩—云母片岩矿物成分及变质作用 $P-T$ 条件

李 蓉<sup>1</sup>, 孙德有<sup>1\*</sup>, 铃木和博<sup>2</sup>, 郑常青<sup>1</sup>

1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061

2. 名古屋大学年代测定综合研究中心, 日本名古屋 464-8602

**摘要:** 黑龙江构造混杂岩中保留着一套曾遭受过中高压变质作用的岩石, 其代表性岩石为: 蓝片岩—云母片岩; 蓝闪石、铁蓝闪石和多硅白云母(单位结构中  $Si=3.37\sim3.46>3.30$ ) 等具有中高压性质的典型变质矿物在岩石中平衡共生。蓝片岩—云母片岩组合至少经历了早期和晚期两阶段变质, 早期为绿帘蓝片岩相, 变质温压条件为  $T=320\sim460\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P=7.8\times10^8\sim11\times10^8\text{ Pa}$ 。晚期为高绿片岩相, 出现富镁绿泥石( $X_{Mg}=0.565\sim0.646$ ) 交代早期钠质角闪石和多硅白云母等高压变质矿物现象, 变质温度升高而压力有所降低, 由石榴石云母片岩所限定的高绿片岩相变质条件为  $T=536\sim598\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P=6.8\times10^8\sim9.5\times10^8\text{ Pa}$ , 属中温和中高压变质。

**关键词:** 蓝片岩; 云母片岩; 矿物成分; 黑龙江杂岩; 岩石学; 地球化学。

中图分类号: P584

文章编号: 1000-2383(2013)02-0277-12

收稿日期: 2012-04-15

## Mineral Compositions and $P-T$ Conditions of the Blueschist-Mica Schist in Heilongjiang Complex

LI Rong<sup>1</sup>, SUN De-you<sup>1\*</sup>, Kazuhiro Suzuki<sup>2</sup>, ZHENG Chang-qing<sup>1</sup>

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2. The Center for Chronological Research, Nagoya University, Nagoya 464-8602, Japan

**Abstract:** A sequence of middle-high-pressure metamorphic rocks occurs in the Heilongjiang Complex, whose representative lithology is blueschist and mica schist. Characteristic minerals of middle-high-pressure metamorphism, such as glaucophane, ferro-glaucophane and phengite ( $Si=3.37\text{ to }3.46>3.30$ ) are observed in the metamorphic rocks. The rock association, blueschist and mica schist, has suffered at least two stages of metamorphism. The  $P-T$  conditions are estimated to be 320 to 460  $^{\circ}\text{C}$  and  $7.8\times10^8$  to  $11\times10^8\text{ Pa}$ , which correspond to early stage epidote-blueschist facies. The late stage is high-greenschist facies, which is characterized by the replacement of glaucophane and phengite by magnesium-rich ( $X_{Mg}=0.565\text{ to }0.646$ ) chlorite. The metamorphic conditions constrained by garnet mica schist are 536~598  $^{\circ}\text{C}$  and  $6.8\times10^8$  to  $9.5\times10^8\text{ Pa}$ , consistent with medium temperature and middle-high pressure metamorphism.

**Key words:** blueschist; mica schist; mineral compositions; Heilongjiang complex; petrology; geochemistry.

黑龙江构造混杂岩带是中国东北地区迄今发现的规模最大的高压变质岩带, 出露于黑龙江省东部的依兰、磨刀石和太平沟等地, 由蓝片岩、蛇绿岩、云母片岩等组成, 被认为是佳木斯地块和松嫩地块碰撞拼合的产物, 近年来成为国内外地质界研究的热点地区。

黑龙江杂岩的地质特征、原岩性质及时代、产出的大地构造背景、变质时代以及后期的变质变形等特征, 对研究佳木斯地块及邻区主要构造单元的大地构造性质与演化具有十分重要意义。随着研究的深入, 有关黑龙江构造混杂岩的岩石组成、形成

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(No. 41172058); 中国地质调查局项目(No. 1212010070301)。

**作者简介:** 李蓉(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事岩石地球化学研究。E-mail: lirong10@mails.jlu.edu.cn

\* **通讯作者:** 孙德有, E-mail: sundy@jlu.edu.cn

时间和构造变形演化等资料成果已有许多报道(白景文等,1988,1989;张兴洲和张元厚,1991;曹熹等,1992;叶慧文等,1994;李锦轶等,1999;宋海峰,2006;Wu *et al.*, 2007;李伟民,2008;孔凡梅等,2009;Zhou *et al.*, 2009;周建波等,2010),但系统研究该杂岩的矿物成分和变质作用演变的资料很少报道. 本文以依兰地区出露的黑龙江杂岩为对象,对其内蓝片岩—云母片岩的矿物成分及变质条件进行了研究.

## 1 地质背景

研究区位于佳木斯地块西缘,以牡丹江断裂为界,与西侧的松嫩地块相接. 佳木斯地块曾被认为是兴蒙造山带内部的中间地块,主要由太古代的麻山群、元古代的黑龙群(即黑龙江杂岩)两套变质地层和面积的元古代花岗质岩石以及中生代盖层所组成. 然而近十几年来的一系列研究证明,其上所谓的黑龙群并非是一套正常的变质地层,而是一套混有肢解的蛇绿岩套岩石组合,并遭受了蓝片岩相—绿片岩相变质作用的构造混杂(张兴洲和张元厚,1991;曹熹等,1992;李锦轶等,1999),目前保存下来的蓝片岩带应为遭受高压变质作用并仰冲到佳木斯地块之上的大规模增生杂岩带的残余部分,是印支期前后古亚洲洋构造域向环太平洋构造域转换的结果(周建波等,2010);也有学者研究认为该高压变质带形成于加里东期(张兴洲等,1992)或形成于侏罗纪(Wu *et al.*, 2007). 而所谓的元古代花岗岩形成时代应为显生宙(Wu *et al.*, 2011),麻山群的变质时代也并非为太古代,而是在 500 Ma 左右(Wilde *et al.*, 2003).

黑龙江杂岩主要沿牡丹江断裂呈南北向带状分布,出露比较集中,主要见于北段的萝北—嘉荫、中段的依兰和南段的牡丹江—穆棱 3 个地区(黑龙江省区域地质志,1993)(图 1). 依兰地区的黑龙江杂岩由基质与岩块两部分组成,基质为一套具有大陆边缘沉积特点的泥质和长英质变质岩,如云母片岩、石英片岩等. 岩块中的超基性岩、变质辉长岩、变质基性火山岩以及变质沉积硅质岩,则是一套肢解的蛇绿岩套岩石组合(张兴洲和张元厚,1991). 这些岩块经历了变质变形作用改造,内部组构发生了很大变化,一些岩石经构造置换作用和变质重结晶作用,转变为具有新生矿物组合和新生面状构造的似层状岩石(宋海峰,2006). 本文以依兰地区出露的蓝片岩

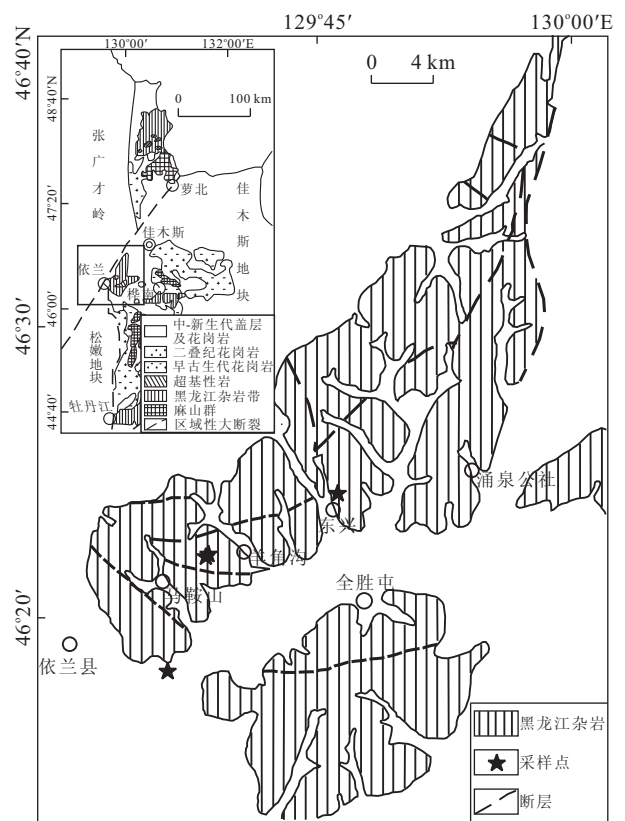


图 1 佳木斯地块地质简图及依兰地区黑龙江杂岩分布简图(据 Zhou *et al.*, 2009, 有修改)

Fig. 1 Geological sketch of the Jiamusi terrane and distribution diagram of Heilongjiang complexes in Yilan area

和云母片岩为研究对象,通过矿物共生组合分析和矿物对温压计估算,确定其变质条件,结果表明二者形成的条件有较大差别,意味着蓝片岩和云母片岩经历了不同变质作用阶段的改造.

## 2 岩相学和矿物化学成分特征

样品采自依兰县以东—倭肯河以北的马鞍山—羊角沟—东兴一带,即东经  $129^{\circ}34'33.8'' \sim 129^{\circ}46'56.8''$ ,北纬  $46^{\circ}17'52.4'' \sim 46^{\circ}24'15.1''$ (图 1),主要岩石类型为蓝片岩类(蓝闪石片岩、绿帘蓝闪绿泥白云母片岩、含黑硬绿泥石绿泥白云母片岩及黑硬绿泥石白云母石英片岩)和二云母片岩.

### 2.1 岩相学特征

蓝闪石片岩:片柱状变晶结构,片状构造,特征变质矿物为钠质角闪石(45%~50%)、黑硬绿泥石(~2%),其他主要矿物为多硅白云母(~30%)、钠长石(10%~15%)和石英(~10%),副矿物为榍石、电气石和少量石墨. 钠质角闪石可见两期,早期钠质

角闪石定向与基质方向一致,粒度  $0.8 \times 0.12 \sim 2.0 \times 0.10 \text{ mm}^2$ ,晚期分布无一定方向,粒度  $0.4 \times 0.20 \sim 0.1 \times 0.15 \text{ mm}^2$ ,呈柱状、放射状集合体,斜消光,具天蓝—浅紫—浅黄色的多色性;多硅白云母呈细鳞片状,干涉色达三级蓝绿;黑硬绿泥石为浅黄褐色,正高突起,针柱状和放射状集合体,正延性,含量较少,仅局部可见与晚期钠质角闪石共生;钠长石呈板状,一级灰干涉色,粒度  $0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$ ;石英,粒状,干涉色一级黄白,粒度  $0.08 \sim 0.20 \text{ mm}$ . 主要矿物组合为钠质角闪石+多硅白云母+钠长石+石英.

绿帘蓝闪绿泥石白云母片岩:片柱状变晶结构,片状构造. 特征变质矿物为钠质角闪石( $\sim 10\%$ )、绿泥石( $\sim 15\%$ )和绿帘石( $\sim 5\%$ ),其他主要矿物是多硅白云母( $60\% \sim 65\%$ )和石英( $\sim 5\%$ ),副矿物为石墨和榍石. 绿帘石为黄绿色,正高突起,半自形粒状,干涉色鲜艳,粒度  $0.4 \sim 0.6 \text{ mm}$ ;绿泥石交代钠质角闪石、多硅白云母产出,且继承所交代的矿物定向生长,片状、鳞片状集合体,绿色—浅绿色多色性,见异常干涉色,近平行消光;钠质角闪石也可见两期,早期钠质角闪石定向,晚期分布无一定方向,呈蓝—紫色多色性;多硅白云母呈细鳞片状,干涉色鲜艳,达三级蓝绿;石英多为粒状,干涉色一级黄白,粒度  $0.10 \sim 0.25 \text{ mm}$ . 主要矿物组合为钠质角闪石+绿帘石+多硅白云母+石英.

含黑硬绿泥石绿泥石白云母片岩:斑状变晶结构,基质鳞片变晶结构,片状构造. 变斑晶为榍石( $5\% \sim 8\%$ ),特征变质矿物为绿泥石( $\sim 15\%$ )、黑硬绿泥石( $\sim 2\%$ ),基质矿物是多硅白云母( $50\% \sim 55\%$ ),黑云母( $\sim 10\%$ )和石英( $\sim 10\%$ ). 绿泥石交代黑硬绿泥石、多硅白云母和黑云母产出,片状、叶片状集合体,绿色—浅绿色多色性,近平行消光;黑硬绿泥石呈正高突起,柱状,浅黄褐色,正延性,含量少,多为交代残留;多硅白云母多为细鳞片状,干涉色鲜艳;黑云母呈残留丝缕状,深褐色,多色性明显;石英呈粒状,干涉色一级黄白,粒度  $0.1 \sim 0.3 \text{ mm}$ ;榍石呈正极高突起,长柱状,灰黑色,粒度  $0.6 \sim 0.8 \text{ mm}$ . 主要矿物组合为黑硬绿泥石+多硅白云母+黑云母+石英.

黑硬绿泥石白云母石英片岩:柱状粒状变晶结构,片状构造. 特征变质矿物为黑硬绿泥石( $\sim 20\%$ )和少量绿泥石( $\sim 3\%$ ),主要矿物为石英( $40\% \sim 45\%$ )、多硅白云母( $\sim 30\%$ )和钠长石( $\sim 10\%$ ). 黑硬绿泥石见有两个世代,第一世代呈杆状,鳞片状集

合体,定向与基质方向一致分布;第二世代呈柱状,放射状集合体,分布无一定方向性,显然为变形后生长之产物. 二者均为黄褐色,高突起,正延性;绿泥石呈细针柱状产于鳞片状白云母内,在个别第一世代的黑硬绿泥石颗粒周围呈细小片状;石英为粒状,干涉色一级黄白,粒度  $0.2 \sim 0.4 \text{ mm}$ ;钠长石多为他形,粒度  $0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ ;多硅白云母呈细鳞片状,多暗化,干涉色鲜艳. 主要矿物组合为黑硬绿泥石+多硅白云母+石英+钠长石+绿泥石.

石榴石二云母片岩:斑状变晶结构,基质为细粒粒状片状变晶结构,片状构造. 变斑晶为石榴石( $\sim 15\%$ ),基质为黑云母( $25\% \sim 30\%$ )、白云母( $\sim 30\%$ )、斜长石( $\sim 20\%$ )和石英( $\sim 10\%$ ),还可见石墨、电气石等副矿物. 石榴石呈变斑晶形式存在,自形或半自形粒状,正极高突起,粒度  $0.1 \sim 0.4 \text{ mm}$ ,无环带现象;黑云母多为片状,多色性明显,一组极完全解理,平行消光;白云母呈片状,闪突起明显,平行消光,二者连续定向排列构成主片理;石英可见沿片理方向被轻微拉长,粒度  $0.3 \sim 0.7 \text{ mm}$ ,具波状消光;斜长石:干涉色一级灰,见聚片双晶,粒度  $0.2 \sim 0.7 \text{ mm}$ . 矿物组合为石榴石+黑云母+白云母+斜长石+石英.

## 2.2 矿物化学成分分析

本文矿物测试分析工作在日本名古屋大学地球环境学科电子探针室完成. 加速电压为  $15 \text{ kV}$ ,测试电流  $2.50 \times 10^{-8} \text{ A}$ ,电子束直径为  $5 \mu\text{m}$ .

钠质角闪石:角闪石分类以 23 个氧原子为基础进行计算,  $\text{Fe}^{2+}$  依据  $\text{Si} + \text{Al} + \text{Ti} + \text{Mg} + \text{Fe} + \text{Mn} = 13$  进行计算. 按 Leak *et al.* (1997) 分类,蓝闪石片岩中早期钠质角闪石端元组分主要为蓝闪石、铁蓝闪石,个别点属镁钠闪石,晚期钠质角闪石端元组分主要为镁钠闪石,少量蓝闪石(图 2a, 2b, 图 3, 表 1);绿帘蓝闪绿泥石白云母片岩中两期钠质角闪石端元组分均为镁钠闪石,但早期镁钠闪石  $X_{\text{Mg}}$  ( $0.615 \sim 0.798$ )及  $\text{Al}^{\text{IV}}$  ( $0.094 \sim 0.286$ )值较晚期的  $X_{\text{Mg}}$  ( $0.791 \sim 0.834$ )及  $\text{Al}^{\text{IV}}$  ( $0.192 \sim 0.338$ )低(图 2c, 表 1).

白云母:矿物成分分析表明,蓝片岩及二云母片岩中白云母单位结构中 Si 值均大于 3.00(表 2),属多硅白云母. 多硅白云母具体又可以分为低硅( $\text{Si} < 3.30$ )、中硅( $\text{Si} = 3.30 \sim 3.50$ )和高硅( $\text{Si} > 3.50$ ). 一般当 Si 原子数大于 3.30 时才是高压、超高压变质形成的多硅白云母(Grimmer *et al.*, 2003). 据此,样品中的多硅白云母可划分为两类,即蓝片岩类



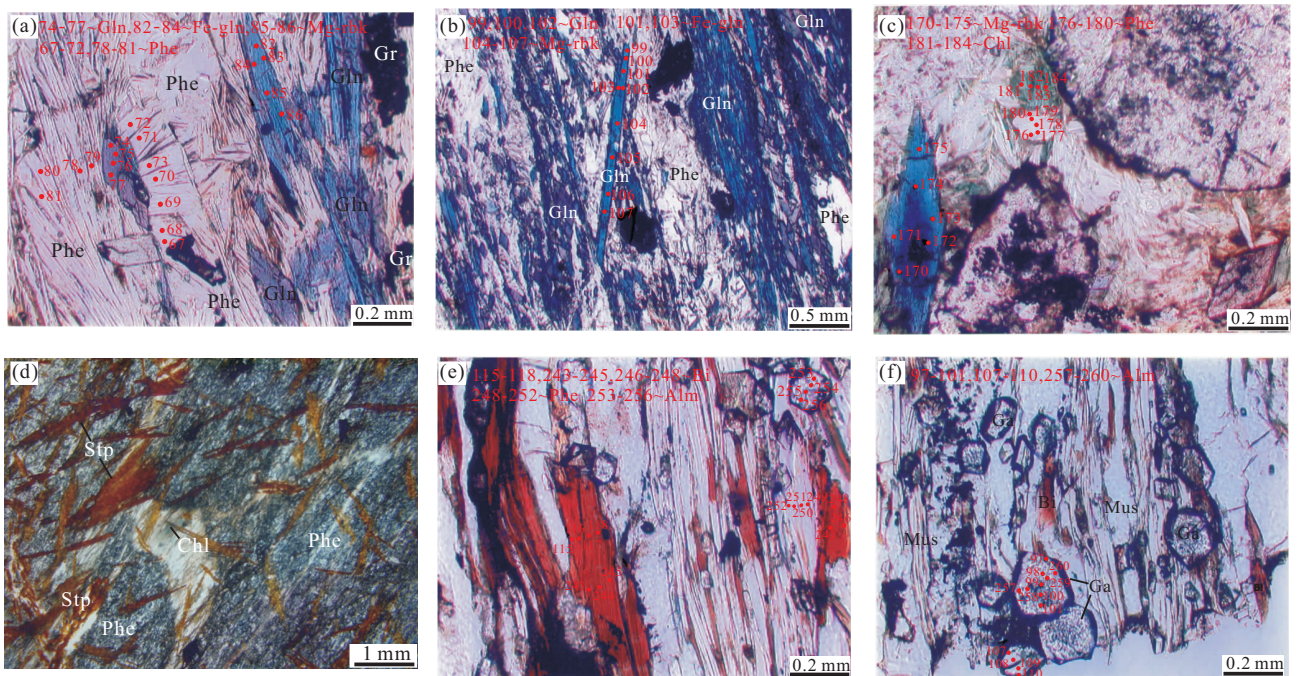


图 2 岩石镜下显微照片

Fig. 2 Microscopically micrograph of the rock sample

a. 蓝闪石片岩; b. 蓝闪石片岩; c. 绿帘蓝闪绿泥白云母片岩; d. 黑硬绿泥石白云石英片岩; e. 石榴石二云母片岩; f. 石榴石二云母片岩

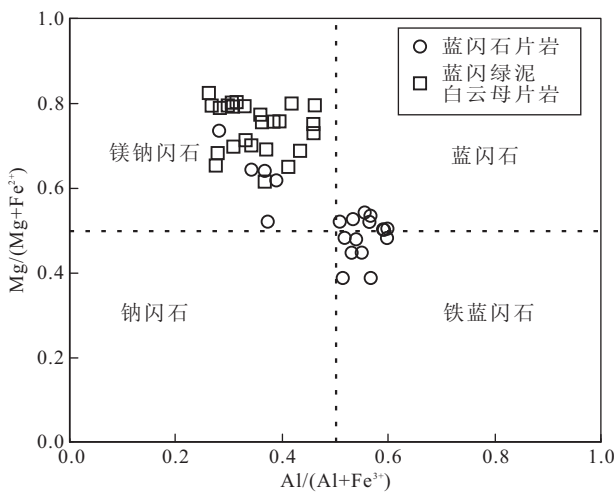


图 3 钠质角闪石的分类(据 Leak *et al.*, 1997, 有修改)

Fig. 3 Classification of sodium amphiboles

中的中硅多硅白云母(Si=3.37~3.46)和二云母片岩中的低硅多硅白云母(Si=3.12~3.21)。

**黑云母:**二云母片岩中的黑云母 Fe<sup>2+</sup> 含量为 0.70~0.91, Fe<sup>3+</sup> 为 0.16~0.24; 单位结构中 Mg 为 1.15~1.43, 含 Ti 量较低 0.09~0.13(表 3)。

**石榴石:**二云母片岩中的石榴石 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 20.80%~21.17%, FeO 为 26.22%~29.57%, MnO 为 3.30%~3.88%, MgO 约 1.83%~2.44%, CaO 为 6.28%~9.35%, 为铁铝榴石, 石榴

石端元组分变化范围为 Alm<sub>58~66</sub> Py<sub>7~10</sub> Grs<sub>18~26</sub> Sps<sub>7~9</sub>, 单颗粒石榴石成分较均一, 没有明显的核一边分带现象(图 2e, 2f, 表 3)。

**绿泥石:**蓝片岩类岩石中绿泥石单位结构中 Fe 含量为 3.40~4.05, Mg 为 5.07~6.20(表 4), 端元组分为蠕绿泥石和密绿泥石, 二者含铁量较少, 属富镁绿泥石[Mg/(Mg+Fe)=0.565~0.646], 其可与绿帘石在高压绿片岩相中稳定共生。

**斜长石:**蓝片岩类岩石中出现的斜长石属钠长石(Ab>99), 而云母片岩中的斜长石属更长石(Ab=75~87)。

**黑硬绿泥石:**黑硬绿泥石白云母片岩中晚期黑硬绿泥石 K<sub>2</sub>O 含量为 0.09%~0.45%, 100×Fe/(Mg+Fe) 比值为 57~61。

### 3 变质作用 P-T 条件研究

电子探针分析显示, 蓝片岩类岩石中多硅白云母的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 14.33%~25.79%, FeO 为 4.67%~19.03%(表 2), 在 FeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 图解(图 4)中, 多硅白云母属蓝片岩相变质, 该变质相形成的温压条件一般为 P=3×10<sup>8</sup>~12×10<sup>8</sup> Pa, T=200~500 °C, 出现蓝闪石、硬柱石、硬玉和霏石等典型高

表 1 依兰地区蓝片岩类岩石中钠质角闪石矿物化学成分 (%)

Table 1 Chemical compositions of sodium amphiboles in Blueschist from the Yilan area (%)

岩性	蓝闪石片岩(DY0371-7)																绿帘蓝闪绿泥白云母片岩(DY0371-3, DY0371-8)															
	76a	77a	82a	83a	84a	99b	100b	101b	104b	105b	106b	107b	128a	129a	130a	131a	148b	149b	150b	151b												
端元组分	Gln	Gln	Fe-gln	Fe-gln	Fe-gln	Gln	Gln	Fe-gln	Mg-rbk	Mg-rbk	Mg-rbk	Mg-rbk	Mg-rbk	Mg-rbk	Mg-rbk	Mg-rbk	Mg-rbk	Mg-rbk	Mg-rbk	Mg-rbk												
SiO <sub>2</sub>	54.016	54.218	54.201	54.473	54.875	53.935	54.534	54.404	54.291	53.499	53.262	52.830	54.438	54.514	54.801	54.110	54.059	54.031	54.054	54.110												
TiO <sub>2</sub>	0.020	0.000	0.034	0.013	0.055	0.042	0.035	0.041	0.036	0.040	0.020	0.023	0.026	0.046	0.016	0.034	0.027	0.076	0.094	0.046												
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.852	8.720	7.401	6.802	7.017	7.667	8.383	8.232	7.035	5.676	5.287	4.810	5.749	5.985	6.018	4.338	4.592	4.965	4.629	4.771												
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.636	0.738	0.269	0.159	0.154	0.529	0.509	0.513	0.458	1.225	1.328	1.998	0.905	0.599	0.384	0.840	0.810	1.083	1.196	0.999												
FeO	19.315	19.300	22.002	21.346	21.068	19.674	19.003	19.376	20.278	21.078	21.377	21.988	19.248	18.087	17.947	19.750	18.834	18.676	19.559	18.786												
MnO	0.159	0.216	0.200	0.140	0.143	0.158	0.167	0.154	0.193	0.227	0.227	0.238	0.248	0.157	0.169	0.061	0.107	0.095	0.107	0.143												
MgO	6.077	6.325	4.959	5.837	5.896	6.416	6.286	6.055	6.474	7.278	7.266	7.563	8.721	9.170	8.643	9.467	9.416	9.413	9.182	9.576												
CaO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.024	0.021	0.054	0.026	0.013	0.023	0.028	0.018	0.000	0.005	0.032	0.000	0.000	0.000	0.005												
Na <sub>2</sub> O	6.585	6.508	6.726	6.807	6.834	6.435	6.579	6.535	6.561	6.178	6.086	5.659	6.221	6.517	6.507	6.445	6.186	6.416	6.184	6.503												
K <sub>2</sub> O	0.037	0.027	0.025	0.027	0.012	0.046	0.019	0.037	0.027	0.022	0.048	0.073	0.020	0.022	0.015	0.018	0.011	0.023	0.035	0.011												
Total	95.697	96.052	95.817	95.604	96.054	94.926	95.536	95.401	95.379	95.236	94.924	95.210	95.594	95.097	94.505	95.095	94.042	94.778	95.040	94.950												
Si	7.775	7.760	7.906	7.931	7.941	7.828	7.856	7.867	7.865	7.740	7.740	7.635	7.755	7.787	7.894	7.765	7.808	7.759	7.751	7.759												
Al <sup>IV</sup>	0.225	0.240	0.094	0.069	0.059	0.172	0.144	0.133	0.135	0.260	0.260	0.365	0.245	0.213	0.106	0.235	0.192	0.241	0.249	0.241												
Al <sup>VI</sup>	1.277	1.231	1.178	1.098	1.138	1.139	1.279	1.270	1.066	0.708	0.646	0.454	0.720	0.795	0.916	0.498	0.589	0.599	0.533	0.565												
Fe <sup>3+</sup>	1.026	1.115	0.970	1.025	0.972	1.136	0.952	0.940	1.154	1.662	1.727	2.071	1.690	1.531	1.321	1.828	1.770	1.712	1.834	1.742												
Ti	0.002	0.000	0.004	0.001	0.006	0.005	0.004	0.004	0.004	0.004	0.002	0.002	0.003	0.005	0.002	0.004	0.003	0.008	0.010	0.005												
Cr	0.072	0.084	0.031	0.018	0.018	0.061	0.058	0.059	0.052	0.140	0.153	0.228	0.102	0.068	0.044	0.095	0.092	0.123	0.136	0.113												
Fe <sup>2+</sup>	1.299	1.195	1.714	1.574	1.577	1.252	1.337	1.403	1.302	0.888	0.871	0.586	0.603	0.629	0.841	0.542	0.504	0.531	0.511	0.511												
Mn	0.019	0.026	0.025	0.017	0.018	0.019	0.020	0.019	0.024	0.028	0.028	0.029	0.030	0.019	0.021	0.007	0.013	0.012	0.013	0.017												
Mg	1.304	1.350	1.078	1.267	1.272	1.388	1.350	1.305	1.398	1.570	1.574	1.629	1.852	1.953	1.856	2.025	2.027	2.015	1.963	2.047												
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.003	0.008	0.004	0.002	0.004	0.004	0.003	0.000	0.001	0.005	0.000	0.000	0.000	0.001												
Na	1.838	1.806	1.902	1.921	1.917	1.811	1.837	1.832	1.843	1.733	1.715	1.585	1.718	1.805	1.817	1.793	1.732	1.786	1.719	1.808												
K	0.007	0.005	0.005	0.005	0.002	0.009	0.003	0.007	0.005	0.004	0.009	0.013	0.004	0.004	0.003	0.003	0.002	0.004	0.006	0.002												
Total	14.844	14.811	14.907	14.926	14.919	14.823	14.844	14.847	14.852	14.739	14.727	14.603	14.725	14.809	14.821	14.801	14.734	14.790	14.726	14.811												

注: Gln. 蓝闪石; Fe-gln. 铁蓝闪石; Mg-rbk. 镁钠闪石; a. 早期; b. 晚期.

表 2 依兰地区黑龙江杂岩多硅白云母矿物化学成分(%)  
Table 2 Chemical compositions of phengite in the Heilongjiang complex from Yilan area (%)

岩性 点号	蓝闪石片岩(DY0371-7)							蓝闪绿泥白云母片岩(DX0371-8)							石榴石二云母片岩(DY0366-2)						
	67	68	69	70	71	72	76	177	178	179	180	125	126	127	128	129	130	131			
SiO <sub>2</sub>	48.677	49.129	49.943	49.353	48.916	48.879	48.308	48.226	48.666	48.627	48.008	45.776	45.887	46.056	45.991	45.008	45.335	45.328			
TiO <sub>2</sub>	0.177	0.151	0.152	0.106	0.144	0.110	0.161	0.164	0.140	0.163	0.224	0.861	0.554	0.548	0.606	0.645	1.051	0.652			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24.348	24.973	23.909	25.264	25.452	24.917	25.794	25.496	25.115	25.504	24.912	32.132	31.758	31.887	32.348	31.860	31.189	31.979			
FeO	6.015	5.486	5.618	4.725	5.139	5.458	4.827	5.065	5.049	5.115	5.184	1.873	1.880	1.911	1.916	1.796	1.953	1.689			
MnO	0.044	0.033	0.062	0.044	0.061	0.071	0.020	0.038	0.018	0.002	0.037	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			
MgO	2.899	2.853	3.010	2.827	2.614	2.543	2.839	2.975	3.060	3.035	3.116	1.700	1.828	1.803	1.727	1.612	1.862	1.682			
CaO	0.008	0.006	0.020	0.028	0.012	0.003	0.026	0.019	0.007	0.000	0.027	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			
Na <sub>2</sub> O	0.094	0.141	0.089	0.162	0.147	0.155	0.178	0.298	0.246	0.292	0.278	0.915	0.842	0.880	0.979	0.894	0.830	0.862			
K <sub>2</sub> O	9.718	10.793	10.965	10.448	10.647	10.641	9.114	10.338	10.298	10.699	10.372	9.940	9.976	9.878	9.845	10.004	10.233	10.077			
Total	91.333	92.918	93.121	92.310	92.485	92.130	90.620	91.972	91.952	92.790	91.511	92.550	92.080	92.316	92.765	91.172	91.806	91.622			
Si	3.425	3.409	3.461	3.423	3.400	3.417	3.390	3.371	3.398	3.375	3.378	3.128	3.150	3.152	3.133	3.124	3.134	3.129			
Al <sup>IV</sup>	0.575	0.591	0.539	0.577	0.600	0.583	0.610	0.629	0.602	0.625	0.622	0.872	0.850	0.848	0.867	0.876	0.866	0.871			
Al <sup>VI</sup>	1.443	1.451	1.414	1.489	1.486	1.471	1.523	1.471	1.464	1.461	1.444	1.716	1.720	1.723	1.730	1.731	1.675	1.731			
Ti	0.009	0.008	0.008	0.006	0.008	0.006	0.008	0.009	0.007	0.009	0.012	0.044	0.029	0.028	0.031	0.034	0.055	0.034			
Fe	0.354	0.318	0.326	0.274	0.299	0.319	0.283	0.296	0.295	0.297	0.305	0.107	0.108	0.109	0.109	0.104	0.113	0.098			
Mn	0.003	0.002	0.004	0.003	0.004	0.004	0.001	0.002	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			
Mg	0.304	0.295	0.311	0.292	0.271	0.265	0.297	0.310	0.318	0.314	0.327	0.173	0.187	0.184	0.175	0.167	0.192	0.173			
Ca	0.001	0.000	0.001	0.002	0.001	0.000	0.002	0.001	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			
Na	0.013	0.019	0.012	0.022	0.020	0.021	0.024	0.040	0.033	0.039	0.038	0.121	0.112	0.117	0.129	0.120	0.111	0.115			
K	0.872	0.955	0.969	0.925	0.944	0.949	0.816	0.922	0.917	0.947	0.931	0.866	0.874	0.862	0.856	0.886	0.902	0.887			
Total	6.999	7.049	7.045	7.012	7.031	7.035	6.955	7.052	7.037	7.067	7.061	7.028	7.029	7.024	7.030	7.042	7.048	7.038			

注:白云母分子式计算中用的氧原子基数为 11.

表 3 依兰地区二云母片岩中代表性矿物化学成分 (%)  
Table 3 Chemical compositions of minerals in two-mica schist from the Yilan area (%)

成分 点号	石榴石												斜长石												黑云母				
	97	98	99	100	101	101	253	254	255	256	228	229	230	115	116	117	118	119	243	244	245								
SiO <sub>2</sub>	36.181	36.476	36.595	36.269	36.647	36.984	37.026	36.939	37.009	37.009	61.919	62.278	62.803	SiO <sub>2</sub>	35.911	35.424	35.184	35.505	34.039	37.044	36.605	36.523							
TiO <sub>2</sub>	0.053	0.033	0.083	0.065	0.038	0.048	0.038	0.039	0.063	0.063	23.547	23.358	22.734	TiO <sub>2</sub>	1.532	1.565	1.661	1.755	1.632	2.173	1.631	1.694							
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.826	20.917	20.849	20.846	21.004	21.170	21.067	21.065	21.003	21.003	0.018	0.033	0.029	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.059	17.032	17.080	17.364	16.145	18.027	17.441	17.065							
FeO	27.588	26.897	26.512	28.196	28.512	27.139	29.094	29.219	26.964	26.964	5.064	4.694	4.012	FeO	16.560	16.876	17.058	17.034	18.384	16.056	16.883	17.463							
MnO	3.278	3.487	3.416	3.799	3.769	3.344	3.535	3.640	3.301	3.301	8.810	8.982	9.458	MnO	0.044	0.079	0.069	0.076	0.027	0.086	0.052	0.093							
MgO	1.858	2.129	2.111	2.358	2.232	1.983	2.132	2.187	1.883	1.883	0.059	0.053	0.056	MgO	12.487	11.842	11.691	11.637	11.032	10.079	12.150	11.850							
CaO	8.800	8.592	8.955	7.295	7.400	8.879	7.200	6.774	9.312	9.312	0.000	0.000	0.000	CaO	0.013	0.068	0.024	0.031	0.217	0.043	0.049	0.100							
Total	98.584	98.531	98.521	98.828	99.602	99.547	100.09	99.863	99.535	99.535	99.417	99.398	99.092	Total	92.437	91.071	91.201	92.012	88.570	92.002	93.429	93.119							
Si	2.948	2.962	2.968	2.948	2.956	2.969	2.971	2.971	2.973	2.973	2.760	2.773	2.802	K <sub>2</sub> O	9.295	8.609	8.898	9.143	7.617	9.025	9.017	8.822							
Ti	0.003	0.002	0.005	0.004	0.002	0.003	0.002	0.002	0.004	0.004	1.237	1.226	1.195	Total	92.437	91.071	91.201	92.012	88.570	92.002	93.429	93.119							
Al	1.999	2.001	1.993	1.997	1.997	1.997	1.992	1.997	1.989	1.989	0.001	0.001	0.001	Si	2.764	2.765	2.751	2.751	2.751	2.836	2.780	2.790							
Fe	1.879	1.826	1.798	1.917	1.923	1.822	1.952	1.965	1.811	1.811	0.242	0.224	0.192	Al <sup>IV</sup>	1.236	1.235	1.249	1.249	1.249	1.164	1.220	1.210							
Mn	0.226	0.240	0.235	0.262	0.257	0.227	0.240	0.248	0.225	0.225	0.761	0.775	0.818	Al <sup>VI</sup>	0.312	0.332	0.325	0.336	0.288	0.463	0.342	0.326							
Mg	0.226	0.258	0.255	0.286	0.268	0.237	0.255	0.262	0.226	0.226	0.003	0.003	0.003	Ti	0.089	0.092	0.098	0.102	0.099	0.125	0.093	0.097							
Ca	0.768	0.747	0.778	0.635	0.639	0.764	0.619	0.584	0.801	0.801	0.000	0.000	0.000	Fe <sup>3+</sup>	0.157	0.195	0.178	0.185	0.216	0.325	0.199	0.214							
Total	8.049	8.036	8.031	8.049	8.043	8.026	8.031	8.029	8.029	8.029	5.004	5.003	5.011	Fe <sup>2+</sup>	0.909	0.907	0.938	0.918	1.026	0.703	0.873	0.902							
Py	7.3	8.4	8.3	9.2	8.7	7.8	8.3	8.6	7.4	7.4	24.0	22.3	18.9	Mn	0.003	0.005	0.005	0.005	0.002	0.006	0.003	0.006							
Alm	60.6	59.5	58.6	61.8	62.3	59.7	63.7	64.2	59.1	59.1	75.6	77.4	80.8	Mg	1.433	1.378	1.363	1.344	1.329	1.150	1.376	1.349							
Gro	24.8	24.3	25.4	20.5	20.7	25.0	20.2	19.1	26.2	26.2	0.3	0.3	0.3	Ca	0.001	0.006	0.002	0.003	0.019	0.004	0.004	0.008							
Sp	7.3	7.8	7.7	8.4	8.3	7.5	7.8	8.1	7.3	7.3	0.027	0.034	0.028	Na	0.027	0.034	0.028	0.017	0.019	0.017	0.037	0.023							
											0.913	0.857	0.888	K	0.913	0.857	0.888	0.904	0.785	0.882	0.874	0.860							
											7.843	7.805	7.822	Total	7.843	7.805	7.822	7.815	7.784	7.675	7.801	7.786							

注:离子计算石榴石 O=12,斜长石 O=8,黑云母 O=11(黑云母数据用 Geokit 软件计算).

表 4 依兰地区蓝片岩类岩石中绿泥石矿物化学成分(%)

Table 4 Chemical compositions of chlorite in Blueschist from the Yilan area (%)

岩性 点号 端元组分	蓝闪绿泥白云母片岩(DY0371-3)										蓝闪绿泥白云母片岩(DY0371-8)									
	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	155	156	166	181	182	183	184			
	Pyc	Pyc	Pyc	Peh	Peh	Peh	Peh	Peh	Peh	Pyc	Pyc	Pyc	Pyc	Peh	Peh	Pyc	Pyc			
SiO <sub>2</sub>	27.388	26.175	26.818	26.450	25.937	26.189	26.257	26.311	26.176	26.456	26.749	26.838	26.604	26.226	26.225	26.413	26.746			
TiO <sub>2</sub>	0.001	0.007	0.018	0.024	0.012	0.032	0.029	0.041	0.011	0.032	0.041	0.031	0.047	0.057	0.035	0.079	0.035			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.734	18.722	20.157	19.478	19.767	19.894	19.675	19.307	19.180	19.103	18.300	18.506	18.520	19.035	19.343	18.853	19.092			
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.041	0.022	0.010	0.034	0.055	0.024	0.015	0.046	0.023	0.016	0.002	0.025	0.011	0.005	0.000	0.017	0.004			
FeO	22.078	22.522	21.128	22.243	22.075	22.675	22.706	22.506	22.470	22.550	21.034	20.245	20.018	20.137	19.226	21.004	20.543			
MnO	0.275	0.202	0.278	0.366	0.385	0.341	0.286	0.424	0.268	0.373	0.318	0.295	0.318	0.226	0.323	0.338	0.236			
MgO	16.108	17.208	16.024	17.580	17.755	17.417	17.447	17.709	17.442	17.266	18.923	19.374	19.405	18.980	19.684	18.695	19.236			
CaO	0.069	0.039	0.087	0.035	0.013	0.040	0.024	0.019	0.012	0.064	0.070	0.041	0.088	0.055	0.025	0.077	0.044			
Na <sub>2</sub> O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.012	0.013	0.000	0.000	0.000	0.000			
K <sub>2</sub> O	0.055	0.024	0.014	0.025	0.006	0.009	0.008	0.026	0.030	0.033	0.033	0.006	0.024	0.054	0.026	0.015	0.044			
Total	85.749	84.921	84.534	86.235	86.005	86.621	86.447	86.389	85.612	85.893	85.481	85.373	85.048	84.775	84.887	85.491	85.980			
Si	5.786	5.629	5.723	5.586	5.495	5.518	5.543	5.561	5.580	5.623	5.670	5.668	5.639	5.580	5.545	5.598	5.613			
Ti	0.000	0.001	0.003	0.004	0.002	0.005	0.005	0.007	0.002	0.005	0.007	0.005	0.007	0.009	0.006	0.013	0.006			
Al	4.914	4.745	5.070	4.848	4.935	4.940	4.895	4.809	4.818	4.785	4.572	4.606	4.627	4.773	4.820	4.709	4.722			
Cr	0.007	0.004	0.002	0.006	0.009	0.004	0.003	0.008	0.004	0.003	0.000	0.004	0.002	0.001	0.000	0.003	0.001			
Fe	3.900	4.050	3.770	3.928	3.910	3.995	4.008	3.977	4.005	4.007	3.728	3.575	3.548	3.582	3.399	3.723	3.605			
Mn	0.049	0.037	0.050	0.065	0.069	0.061	0.051	0.076	0.048	0.067	0.057	0.053	0.057	0.041	0.058	0.061	0.042			
Mg	5.074	5.517	5.098	5.535	5.607	5.471	5.491	5.580	5.543	5.470	5.980	6.100	6.132	6.020	6.204	5.907	6.018			
Ca	0.016	0.009	0.020	0.008	0.003	0.009	0.005	0.004	0.003	0.015	0.016	0.009	0.020	0.013	0.006	0.017	0.010			
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.005	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000			
K	0.015	0.007	0.004	0.007	0.002	0.002	0.002	0.007	0.008	0.009	0.009	0.002	0.006	0.015	0.007	0.004	0.012			
Total	19.761	19.999	19.740	19.987	20.032	20.006	20.004	20.028	20.011	19.983	20.044	20.026	20.045	20.032	20.044	20.035	20.027			
Mg/Mg+Fe	0.565	0.577	0.575	0.585	0.589	0.578	0.578	0.584	0.581	0.577	0.616	0.630	0.633	0.627	0.646	0.613	0.625			

注:Pyc. 密绿泥石;Peh. 蠕绿泥石(O=28).



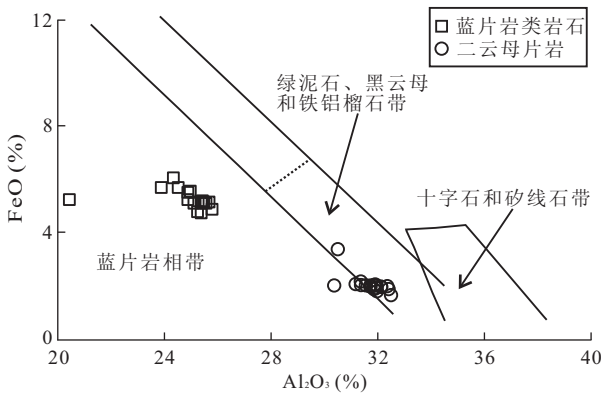


图 4 白云母成分与变质程度关系(据 Miyashiro, 1979)

Fig. 4 The relationship of composition of white mica and metamorphic grade

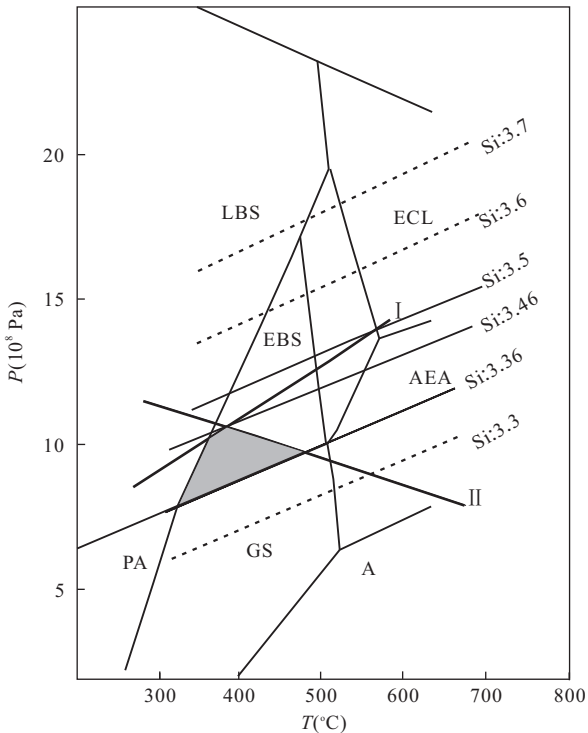


图 5 依兰地区黑龙江杂岩带中蓝片岩类的  $P-T$  条件估算( $P-T$  网格线据 Evans, 1990, 多硅白云母压力计据 Massonne and Szpurka, 1997)

Fig. 5 Estimated  $P-T$  conditions of blue schist from Heilongjiang complex in the Yilan area

图中 LBS, EBS, ECL, AEA, GS, PA, A 分别表示: 硬柱石蓝片岩相、绿帘蓝片岩相、榴辉岩相、钠长—绿帘角闪岩相、绿片岩相和绿帘角闪岩相和角闪岩相。(I)  $Jd + Qtz = Ab$  (Holland, 1983); (II)  $Grs + Rt + Qtz + H_2O = Zo + Tit$  (Holland and Powell, 1998), 阴影区域为本文所研究矿物的稳定区

压变质矿物; 石榴石二云母片岩中的多硅白云母  $Al_2O_3$  含量为 29.39%~32.50%, FeO 为 1.55%~3.31%, 在图 4 中主体落入铁铝榴石带, 个别点落入

蓝片岩相区。泥质岩中的铁铝榴石带与高绿片岩相大致相当, 典型泥质变质岩的铁铝榴石带矿物共生组合为铁铝榴石、黑云母、白云母、石英及更长石, 这与本文所研究的石榴石二云母片岩的矿物组合完全一致。

在蓝片岩类岩石中平衡共生的矿物是铁蓝闪石、蓝闪石、镁钠闪石、多硅白云母以及绿帘石、钠长石、石英, 未出现硬柱石和石榴石, 这表明本区蓝片岩类为绿帘蓝片岩相变质 (Evans, 1990)。根据 Massonne and Szpurka (1997) 提出的多硅白云母压力计, 结合本文所研究样品的多硅白云母中 Si 值 (3.36~3.46), 限定该蓝片岩类岩石的变质条件为  $T=320\sim460\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P=7.8\times 10^8\sim11\times 10^8\text{ Pa}$  (图 5), 这一结果与 Zhou *et al.* (2009) 的研究结果较为吻合。

石榴石—黑云母温度计被广泛应用于变质作用温度的估算, 其是根据平衡共生石榴石—黑云母间 Fe-Mg 分配系数与温度变化关系而建立的。本文所研究的石榴石粒度较小, 环带结构不明显, 说明在变质作用过程中, 石榴石颗粒内部的化学成分已达到均一。黑云母矿物化学成分分析也显示其矿物化学成分较均一, 可以用该温度计对二云母片岩的温度进行估算。Wu *et al.* (2004) 据经验标定的石榴石—黑云母—斜长石—石英压力计 (GBPQ) 与石榴石—黑云母温度计在热力学上是内洽的, 校正的温压条件范围为  $P=1.0\times 10^8\sim11.4\times 10^8\text{ Pa}$ ,  $T=515\sim878\text{ }^\circ\text{C}$ , 矿物成分石榴石  $X_{grs} > 3\%$ , 斜长石  $X_{an} > 17\%$ , 黑云母  $X_{Al} > 3\%$ , 由此, 本文选取 GB (Holdaway, 2000) 温度计和 GBPQ (Wu *et al.*, 2004) 压力计来估算二云母片岩的变质温压条件。

石榴石、黑云母及斜长石矿物化学成分见表 3。详细计算公式及有关参数计算参见 Wu *et al.* (2004)。计算结果如表 5 所示, 即黑龙江杂岩中的石榴石二云母片岩的变质条件为  $T=536\sim598\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P=6.8\times 10^8\sim9.5\times 10^8\text{ Pa}$ 。

### 4 讨论与结论

闪石族矿物中  $Al^{IV}$  和  $Al^{VI}$  的含量变化与温压条件有一定的联系, 一般认为压力越大, 角闪石  $Al^{VI}$  含量越高, 而温度越高,  $Al^{IV}$  的含量就越高。蓝闪石片岩及蓝闪绿帘石白云母片岩中蓝闪石、铁蓝闪石的  $Al^{IV}$  含量为 1.06~1.28, 镁钠闪石  $Al^{IV}$  为 0.40~1.07, 这说明前者较后者形成的压力高, 但在  $Na_{M1}$ -

表 5 石榴石二云母片岩温压估算结果

Table 5 The  $P$ - $T$  conditions estimate result of Two mica schist from the Yilan area

输入值			计算值				输入值										
$T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$P$ ( $10^8$ Pa)	$T_{\text{gb}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\bar{P}_{1,2}$ ( $10^8$ Pa)	$P_1$ ( $10^8$ Pa)	$P_2$ ( $10^8$ Pa)	$\text{Fe}_{\text{tot-bio}}$	$\text{Mg-bio}$	$\text{Al}^{\text{VI-bio}}$	$\text{Ti-bio}$	$\text{Ca-pl}$	$\text{Na-pl}$	$\text{K-pl}$	$\text{Fe-grt}$	$\text{Mg-grt}$	$\text{Ca-grt}$	$\text{Mn-grt}$	
542	9.3	542	9.3	9.1	9.4	1.066	1.365	0.355	0.094	0.242	0.761	0.003	1.879	0.226	0.768	0.226	
569	8.4	569	8.4	8.3	8.5	1.083	1.357	0.341	0.097	0.224	0.388	0.002	1.826	0.258	0.747	0.240	
576	8.5	576	8.5	8.3	8.6	1.102	1.378	0.332	0.092	0.192	0.409	0.002	1.917	0.286	0.635	0.262	
566	7.8	566	7.8	7.7	7.9	1.115	1.363	0.325	0.098	0.224	0.388	0.002	1.923	0.268	0.639	0.257	
567	9.5	567	9.5	9.4	9.6	1.104	1.344	0.336	0.102	0.242	0.761	0.003	1.883	0.255	0.666	0.256	
582	7.9	582	7.9	7.7	8.1	1.242	1.329	0.288	0.099	0.224	0.388	0.002	1.943	0.267	0.612	0.257	
536	6.8	536	6.8	6.6	6.9	1.116	1.349	0.326	0.097	0.224	0.388	0.002	2.031	0.243	0.553	0.240	
539	8.0	539	8.0	7.8	8.2	1.135	1.365	0.311	0.101	0.192	0.409	0.002	1.897	0.221	0.714	0.229	
567	9.5	567	9.5	9.3	9.6	1.126	1.344	0.316	0.105	0.242	0.761	0.003	1.912	0.256	0.668	0.249	
560	7.7	560	7.7	7.7	7.8	1.067	1.367	0.361	0.094	0.224	0.388	0.002	1.931	0.270	0.644	0.250	
560	7.9	560	7.9	7.8	8.0	1.059	1.388	0.348	0.098	0.192	0.409	0.002	1.953	0.280	0.596	0.264	
553	8.2	553	8.2	8.1	8.3	1.055	1.368	0.350	0.097	0.224	0.388	0.002	1.811	0.237	0.812	0.234	
581	9.3	581	9.3	9.3	9.3	1.028	1.150	0.463	0.125	0.192	0.409	0.002	1.809	0.241	0.810	0.242	
562	8.3	562	8.3	8.2	8.5	1.072	1.376	0.342	0.093	0.224	0.388	0.002	1.783	0.244	0.776	0.245	
550	8.0	550	8.0	8.0	8.1	1.029	1.346	0.371	0.102	0.224	0.388	0.002	1.822	0.237	0.764	0.227	
598	9.0	598	9.0	9.0	9.0	1.028	1.150	0.463	0.125	0.192	0.409	0.002	1.905	0.292	0.613	0.264	
544	7.3	544	7.3	7.2	7.4	1.049	1.363	0.338	0.105	0.224	0.388	0.002	1.952	0.255	0.619	0.240	
548	7.6	548	7.6	7.5	7.7	1.055	1.366	0.342	0.102	0.192	0.409	0.002	1.965	0.262	0.584	0.248	
570	9.0	570	9.0	9.1	9.0	1.028	1.150	0.463	0.125	0.192	0.409	0.002	1.811	0.226	0.801	0.225	
571	9.4	571	9.4	9.3	9.5	1.029	1.346	0.371	0.102	0.242	0.761	0.003	1.915	0.284	0.611	0.258	
574	8.3	574	8.3	8.3	8.4	1.049	1.363	0.338	0.105	0.192	0.409	0.002	1.905	0.292	0.613	0.264	

$\text{Al}^{\text{IV}}$  图解中二者的差别并不明显,均在  $7.0 \times 10^8$  Pa 以上(图 6),蓝闪石—铁蓝闪石形成压力仅总体上略高,这与岩石中矿物共生组合所限定的压力条件相吻合,显示了岩石的高压变质特征。

蓝闪石片岩及蓝闪绿泥石白云母片岩中蓝闪石—铁蓝闪石的  $\text{Al}^{\text{VI}}$  含量为 0.06~0.29,镁钠闪石的  $\text{Al}^{\text{VI}}=0.09\sim 0.37$ ,且与蓝闪石、铁蓝闪石伴生的多硅白云母中钠云母含量为 2.88%~4.20%,而与镁钠闪石伴生的多硅白云母中钠云母含量为 1.20%~2.30%,表明镁钠闪石形成于相对较高的温度环境。在绿帘蓝闪绿泥石白云母片岩中的白云母为中硅多硅白云母,富镁绿泥石广泛交代镁钠闪石;含黑硬绿泥石白云母片岩中的绿泥石也呈交代形式产出,主要交代矿物为黑硬绿泥石和多硅白云母,且交代产出的富镁绿泥石继承所交代矿物定向生长。曹熹等(1992)对本区变质变形岩石的研究中还观察到在最后变形阶段,绿泥石成粗大的片状与钠长石及绿帘石平衡共生,结合本区的构造演化历史,这些现象似乎反映了黑龙江杂岩在早期高压变质作用后期阶段,有向高绿片岩相变质作用过渡的特征。

曹熹等(1992)、宋海峰(2006)对本区黑龙江杂岩带中普遍存在的石榴石进行分析发现,具环带结

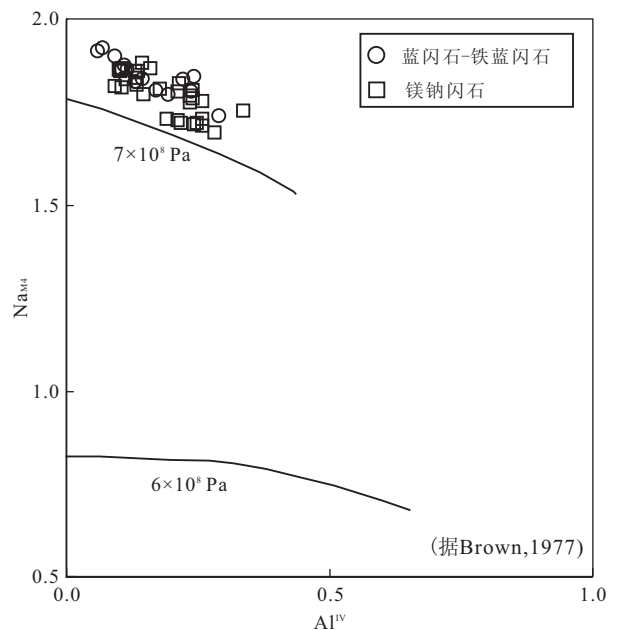


图 6 角闪石矿物中  $\text{Al}^{\text{IV}}$  和  $\text{Na}_{\text{M4}}$  变化图解(转引自宋海峰, 2006)

Fig. 6 The  $\text{Na}_{\text{M4}}-\text{Al}^{\text{IV}}$  variation diagram of the Amphibole

构的较大颗粒石榴石,其端元成分自核部至边部锰铝榴石组分显著降低,而铁铝榴石组分增高,且推测出本区早期存在过钠长石+锰铝榴石+绿帘石±黑

硬绿泥石的组合,部分还可能含有钠质角闪石,代表了早期高压变质事件的存在.核部早期锰铝榴石为边部铁铝榴石取代,锰铝榴石含量的变化与温压条件的改变有着密切关系,它随着温度的升高、压力的降低而减少(曹熹等,1992).本文所研究的石榴石二云母片岩中的石榴石颗粒较小、成分均一、无环带现象(图 2e~2f),电子探针分析为铁铝榴石,端元组分组成可与前人报道中石榴石边部矿物成分相对比,且与石榴石共生的多硅白云母指示的压力与蓝片岩类岩石形成的压力相比略有降低,这说明石榴石二云母片岩是在高压变质后期阶段,在温度有所升高,压力略有降低的条件下形成,这与蓝片岩类岩石中大量富镁绿泥石交代镁钠闪石、多硅白云母以及黑硬绿泥石等矿物,所指示的变质条件由绿帘蓝片岩相向高绿片岩相的过渡是一致的.

上述研究表明,由佳木斯地块向西与松嫩地块俯冲形成的黑龙江杂岩早期经历了高压绿帘蓝片岩相变质作用,变质条件为  $T = 320 \sim 460 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P = 7.8 \times 10^8 \sim 11.0 \times 10^8 \text{ Pa}$ ,形成了蓝闪石+铁蓝闪石+多硅白云母( $\text{Si} > 3.30$ )等高压变质矿物共生组合.高压变质作用后期,可能是地壳松弛,导致压力下降、温度升高,向高绿片岩相过渡,此时在蓝片岩类中出现富镁绿泥石广泛交代早期钠质角闪石、多硅白云母等高压矿物现象,在变质泥质岩石中形成铁铝榴石+黑云母+多硅白云母+石英+更长石的矿物共生组合.由石榴石二云母片岩所限定的该阶段变质作用温压条件为  $T = 536 \sim 598 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P = 6.8 \times 10^8 \sim 9.5 \times 10^8 \text{ Pa}$ ,属中温和中高压变质.因此,依兰地区的黑龙江杂岩至少经历了早期的低温高压和晚期中温中高压两阶段变质作用.

致谢:样品分析测试中得到了日本名古屋大学理学部地球行星科学科榎並正樹教授和名古屋大学年代测定综合研究中心加藤丈典博士的帮助,在此表示衷心的感谢!

## References

- Bai, J. W., Wang, W. X., Zhang, H. R., 1988. Character of Glaucophane Schists in Metamorphic Zone in Yilian, Mudanjiang, Heilongjiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 7(4): 298—308 (in Chinese with English abstract).
- Bai, J. W., Wang, W. X., Zhang, H. R., 1989. Geological Significance of Blueschist from Metamorphic Rocks of Heilongjiang Group in Yilan and Mudanjiang Districts. *Shenyang Inst. Geol. Min. Res., China Acad. Geol. Sci.*, 18: 61—70 (in Chinese with English abstract).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Heilongjiang Province, 1993. Regional Geology of Heilongjiang Province. Geological Publishing House Press, Beijing (in Chinese).
- Cao, X., Dang, Z. X., Zhang, X. Z., et al., 1992. Jiamusi Composite Terrane. Jilin Science and Technology Publishing House, Changchun (in Chinese).
- Evans, B. W., 1990. Phase Relations of Epidote-Blueschists. *Lithos*, 25(1—3): 3—23. doi: 10.1016/0024—4937(90)90003—J
- Grimmer, J. C., Ratschbacher, L., Williams, M., et al., 2003. When Did the Ultrahigh-Pressure Rocks Reach the Surface? A  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  Zircon,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  White Mica, Si-in-White Mica, Single-Grain Provenance Study of Dabie Shan Synorogenic Foreland Sediments. *Chemical Geology*, 197(1—4): 87—100. doi: 10.1016/S0009—2541(02)00321—2
- Holdaway, M. J., 2000. Application of New Experimental and Garnet Margules Data to the Garnet Biotite Geothermometer. *American Mineralogist*, 85(7—8): 881—892.
- Holland, T. J. B., 1983. The Experimental Determination of Activities in Disordered and Short-Range Ordered Jadeitic Pyroxenes. *Mineral and Petrology*, 82(2—3): 214—220. doi: 10.1007/BF01166616
- Holland, T. J. B., Powell, R., 1998. An Internally Consistent Thermodynamic Data Set for Phases of Petrological Interest. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(3): 309—343. doi: 10.1111/j.1525—1314.1998.00140.x
- Kong, F. M., Li, X. P., Jiao, L. X., et al., 2009. Petrology and  $P-T$  Conditions of Stilpnomelane Schist in the Yilan District, Heilongjiang Province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1917—1923 (in Chinese with English abstract).
- Leake, B. E., Woolley, A. R., Arps, C. E. S., et al., 1997. Nomenclature of Amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *The Canadian Mineralogist*, 35: 219—246.
- Li, J. Y., Niu, B. G., Song, B., et al., 1999. Formation and Its Evolution of Northern Crust of Changbai Mountain. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Li, W. M., 2008. Petrological and Geochronological Research of Blueschist in Heilongjiang Complex and Its Tectonic Signification (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Massonne, H. J., Szpurka, Z., 1997. Thermodynamic Proper-

- ties of White Micas on the Basis of High-Pressure Experiments in the Systems  $K_2O$ - $MgO$ - $Al_2O_3$ - $SiO_2$ - $H_2O$  and  $K_2O$ - $FeO$ - $Al_2O_3$ - $SiO_2$ - $H_2O$ . *Lithos*, 41 (1): 229—250. doi: 10.1016/S0024-4937(97)82014-2
- Miyashiro, 1979. *Metamorphism and Metamorphic Belts*, Translated by Zhou, Y. S. Geological Publishing House Press, Beijing (in Chinese).
- Song, H. F., 2006. Development and Evolution of Heilongjiang Mictite in Yilan Area (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Wilde, S. A., Wu, F. Y., Zhang, X. Z., 2003. Late Pan-African Magmatism in Northeastern China; Shrimp U-Pb Zircon Evidence from Granitoids in the Jiamusi Massif. *Precambrian Research*, 122(1-4): 311—327. doi: 10.1016/S0301-9268(02)00217-6
- Wu, C. M., Zhang, J., Ren, L. D., 2004. Empirical Garnet-Biotite-Plagioclase-Quartz (GBPQ) Geobarometry in Medium-to High-Grade Metapelites. *Journal of Petrology*, 45(9): 1907—1921. doi: 10.1093/petrology/egh038
- Wu, F. Y., Sun, D. Y., Ge, W. C., et al., 2011. Geochronology of the Phanerozoic Granitoids in Northeastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1—30. doi: 10.1016/j.jseas. 2010. 11. 014
- Wu, F. Y., Yang, J. H., Lo, C. H., et al., 2007. The Heilongjiang Group: A Jurassic Accretionary Complex in the Jiamusi Massif at the Western Pacific Margin of Northeastern China. *The Island Arc*, 16(1): 156—172. doi: 10.1016/j.1440-1738. 2007. 01. 00564. x
- Ye, H. W., Zhang, X. Z., Zhou, Y. W., 1994.  $^{40}Ar$ - $^{39}Ar$  Age and Its Geologic Significance of Vein Crossite in Glauco-phane-Schist, Mudanjiang Area. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 24(4): 369—372 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. Z., 1992. The Early Collision History of the Jiamusi Terrane—Evidence of Tectonic and Petrology from the Heilongjiang Suites (Dissertation). Changchun College of geology, Changchun (in Chinese).
- Zhang, X. Z., Zhang, Y. H., 1991. Coexistence of Blueschist with Greenschist; New Evidence for Tectonic Evolution of the Longjiang Suites. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 21 (3): 277—282 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J. B., Han, J., Zhang, X. Z., et al., 2010. Geochemical Characteristics of the Mudanjiang Blueschists in the NE China and Its Tectonic Implications. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(1): 93—104 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J. B., Wilde, S. A., Zhang, X. Z., et al., 2009. The Onset of Pacific Margin Accretion in NE China: Evidence from the Heilongjiang High-Pressure Metamorphic Belt. *Tectonophysics*, 478 (3—4): 230—246. doi: 10.1016/j.tecto. 2009. 08. 009

### 附中文参考文献

- 白景文, 王文兴, 张海驹, 1988. 黑龙江依兰—牡丹江变质带蓝闪片岩特征. *岩石矿物学杂志*, 7(4): 298—308.
- 白景文, 王文兴, 张海驹, 1989. 依兰—牡丹江地区的蓝闪片岩及其地质意义. *中国地质科学院沈阳地质矿产研究所所刊*, 18: 61—70.
- 黑龙江省地质矿产局, 1993. 黑龙江省区域地质志. 北京: 地质出版社.
- 曹熹, 党增欣, 张兴洲, 等, 1992. 佳木斯复合地体. 长春: 吉林科学技术出版社.
- 孔凡梅, 李旭平, 焦丽香, 等, 2009. 黑龙江依兰地区黑硬绿泥片岩岩石学与  $P$ - $T$  条件的研究. *岩石学报*, 25(8): 1917—1923.
- 李锦轶, 牛宝贵, 宋彪, 等, 1999. 长白山北段地壳的形成与演化. 北京: 地质出版社, 1—137.
- 李伟民, 2008. 黑龙江杂岩带中的蓝片岩岩石学、地质学及其地质意义 (硕士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 都城秋穗, 1979. 变质作用与变质带. 周云生译. 北京: 地质出版社.
- 宋海峰, 2006. 依兰地区黑龙江混杂岩的形成与演化 (博士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 叶慧文, 张兴洲, 周裕文, 1994. 牡丹江地区蓝片岩中脉状青铝闪石  $^{40}Ar$ - $^{39}Ar$  年龄及其地质意义. *长春地质学院学报*, 24(4): 369—372.
- 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 (博士学位论文). 长春: 长春地质学院.
- 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. *长春地质学院学报*, 21(3): 277—282.
- 周建波, 韩杰, 张兴洲, 等, 2010. 牡丹江地区蓝片岩的地球化学特征及其大地构造意义. *吉林大学学报(地球科学版)*, 40(1): 93—104.