

初航,王怡丹,许文良等. 2026. 依兰地区黑龙江杂岩红帘石云母石英片岩的岩石学特征及构造意义. 岩石学报,42(07): 2363-2376, doi: 10.18654/1000-0569/2026.07.05; CSTR: 32089.14. APS-ysxb. 2026.07.05

依兰地区黑龙江杂岩红帘石云母石英片岩的岩石学特征及构造意义^{*}

初航^{1,2} 王怡丹¹ 许文良¹ 张晋瑞¹ 朱群^{2**} 常青松² 钟焱²
CHU Hang^{1,2}, WANG YiDan¹, XU WenLiang¹, ZHANG JinRui¹, ZHU Qun^{2**}, CHANG QingSong² and ZHONG Yan²

1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061
2. 中国地质调查局天津地质调查中心(华北地质科技创新中心), 天津 300170
1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China
2. Tianjin Center, China Geological Survey (North China Center for Geoscience Innovation), Tianjin 300170, China
2026-05-17 收稿, 2026-06-11 改回.

Chu H, Wang YD, Xu WL, Zhang JR, Zhu Q, Chang QS and Zhong Y. 2026. Petrological characteristics and tectonic significance of piemontite-mica-quartz schist of Heilongjiang Complex in Yilan area. Acta Petrologica Sinica, 42(7): 2363-2376, doi: 10.18654/1000-0569/2026.07.05; CSTR: 32089.14. APS-ysxb. 2026.07.05

Abstract As a manganese-rich mineral in the epidote group, piemontite is a typical mineral of low-temperature and high-pressure metamorphism and is of great significance in revealing the thermodynamic conditions and dynamic processes of subduction zones. A set of piemontite-mica-quartz schists is developed in the Heilongjiang Complex in the Yilan area of the Heilongjiang Province. This paper conducts a systematic petrographic observation, major element geochemical analysis, phase equilibrium modeling and in-situ mica Rb-Sr chronology study on this piemontite-mica-quartz schist. Combined with previous research advances, this study aims to provide additional petrological evidence for discussing the metamorphic evolution of the Jihei High-Pressure Belt. The results show that the mineral assemblage of the piemontite-mica-quartz schist is piemontite + clinozoisite + biotite + winchite + magnesio-hornblende + albite + quartz. The geochemical characteristics indicate that its protolith was an iron-manganese siliceous rock formed under the influence of submarine hydrothermal fluids in a mid-ocean ridge environment. The phase equilibrium simulation study shows that the peak metamorphic *P-T* conditions of this sample are 0.8 ~ 1.1 GPa / 440 ~ 470°C, and it experienced a clockwise *P-T* path, characterized by cooling and decompression following the peak metamorphism. The peak conditions indicate a low-temperature and high-pressure geothermal gradient. The in-situ mica Rb-Sr dating obtained the metamorphic age of 149 ± 1 Ma for this rock. We speculate that the piemontite-mica-quartz schist and the reported Yilan blueschist experienced the same low-temperature and high-pressure metamorphic event related to the collision and amalgamation of the Jiamusi Block and the Songliao Block caused by the westward subduction of the Paleo-Pacific Plate.

Key words Piemontite; Blueschist facies; Heilongjiang Complex; Phase equilibrium; Mica Rb-Sr geochronology

摘 要 红帘石作为富锰绿帘石族矿物,往往形成于低温高压变质条件,与其有关的变质岩石对揭示俯冲带的热力学条件和动力学过程具有重要意义。黑龙江依兰地区的黑龙江杂岩中发育一套含红帘石的云母石英片岩。本文对该红帘石云母石英片岩开展了显微岩相学观察、主量元素地球化学分析、相平衡模拟以及原位云母 Rb-Sr 年代学研究工作,结合前人研究进展,为探讨吉黑高压带的变质作用演化提供更多岩石学证据。研究结果显示红帘石云母石英片岩矿物组合为红帘石 + 斜黧帘石 + 黑云母 + 蓝透闪石 + 镁钠钙闪石 + 钠长石 + 石英;地球化学特征表明其原岩是洋中脊环境下受海底热液影响形成的富铁锰硅质岩;相平衡模拟研究显示该样品的变质峰期 *P-T* 条件为 0.8 ~ 1.1 GPa/440 ~ 470°C,峰后经历降温降压的顺时针型 *P-T* 轨迹,峰期条件显示低温高压型地热梯度,原位云母 Rb-Sr 定年获得该岩石的变质时代为 149 ± 1 Ma。据此推测红帘石云

^{*} 本文受国家重点研发计划变革性技术关键科学问题重点专项(2021YFA0715104)、国家自然科学基金项目(42372238、42330304)和国家重点研究发展计划项目(SQ2023YFF0800039-02)联合资助。

第一作者简介: 初航,男,1982 年生,正高级工程师,从事变质岩与前寒武纪地质学研究, E-mail: chuhangjal@sina.com

**** 通讯作者:** 朱群,男,1963 年生,研究员,从事地质矿产研究, E-mail: syzqun@sohu.com

母石英片岩与已报道的依兰蓝片岩一同经历了与古太平洋板块向西俯冲导致的佳木斯地块-松辽地块的碰撞拼合相关的低温高压变质事件。

关键词 红帘石; 蓝片岩相; 黑龙江杂岩; 相平衡; 云母 Rb-Sr 定年

中图法分类号 P588.344; P597.3

红帘石是一种富锰绿帘石族矿物,化学式为 $\text{Ca}_2[\text{Mn}, \text{Fe}]\text{Al}_2[\text{Si}_2\text{O}_7][\text{SiO}_4]\text{O}(\text{OH})$, 在单偏光镜下具有鲜红-柠檬黄的多色性,其颜色饱和度与 Mn^{3+} 、 Fe^{3+} 含量呈正相关关系(陈熙皓等, 2024)。红帘石通常被认为形成于低温、高压和高氧逸度的条件(郭晶等, 2024), 是富 Mn 原岩发生低温高压变质作用的典型标型矿物,在国内外有大量报道。例如,彭明生等(1982)提出海南红帘石形成于高氧逸度和碱性介质,温度范围较宽,但低温时更有利于其生长。Enami and Banno (2001)在三波川变质带中的钠长石-黑云母亚带中发现红帘石石英岩与钾锰矿-隐钾锰矿系列和硅锌锰矿-褐锰矿系列的矿物共存,指示其 P - T 轨迹可能经过高压稳定域。索书田等(1993)指出在大别山西南部木兰山蓝片岩相高压变质带中,红帘石产于变酸性火山岩中,与多硅白云母、钠长石、石英共生,可能与高压和高氧逸度条件有关;刘庆祥(1994)提出在鄂西北武当群变质岩中红帘石在钠长浅粒岩中与多硅白云母共生,形成于低温高压条件;王道轩等(2011)在新疆发现了红帘石石英岩,原岩可能是高铁锰质不纯硅质岩,推断出红帘石可能与塔里木板块向西昆仑-帕米尔造山带作 A 型俯冲有关。由此可见,针对含红帘石的变质岩开展变质作用研究有助于重建俯冲带动力学过程。

佳木斯-兴凯地块位于我国东北地区的东部,处于古亚洲洋构造域与古太平洋构造域叠加转换的核心部位,是解析中亚造山带东段地体拼贴过程、揭示两大全球性构造域叠加转换机制的天然实验室。佳木斯-兴凯地块西缘与南缘广泛出露的吉黑高压带,形成于两大构造域叠加转换的关键转折期,保存了古亚洲洋最终闭合、古太平洋俯冲初始启动的连续地质记录,是约束两大构造域时空演化过程的关键地质载体(Zhou *et al.*, 2010; 周建波等, 2013);其中,黑龙江高压蓝片岩带(黑龙江杂岩)是吉黑高压带内出露最完整、研究程度最高的代表性地质单元。本次研究聚焦于依兰地区黑龙江杂岩内的一套含红帘石云母石英片岩,该特殊岩石组合虽在早期区域地质调查与填图工作中已有报道,但迄今为止尚未开展系统的岩石学、变质地质学与地球化学研究,其形成的 P - T 条件、原岩属性、变质演化过程及区域构造意义均不明确。基于此,本文通过详细的野外地质调查、岩相学观察、全岩地球化学分析,结合热力学相平衡模拟,限定了该套含红帘石云母石英片岩的形成 P - T 条件,系统探讨了其原岩属性、变质成因与演化过程,最终揭示了其在吉黑高压带构造演化过程中的地质意义,为区域构造演化提供了新的岩石学证据。

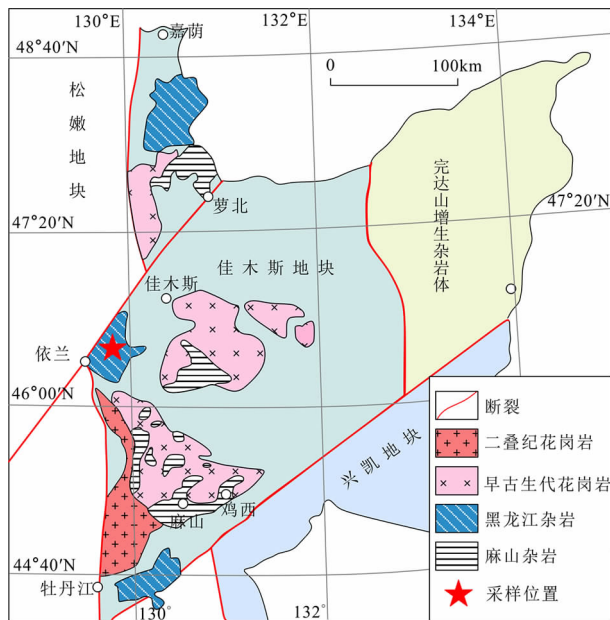


图1 黑龙江杂岩区域地质简图(据周建波等, 2009; 张夺等, 2018)

Fig. 1 Simplified regional geological map of the Heilongjiang Complex (after Zhou *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2018)

1 区域地质背景

我国东北地区处于华北板块、西伯利亚板块与西太平洋板块汇聚部位(周建波等, 2012)。佳木斯地块位于我国黑龙江省东部地区,是中亚造山带东缘的重要构造单元,西侧与松嫩地块相邻,东面与完达山增生杂岩地体相连,向北延入俄罗斯境内(图1),其构造演化复杂,既受晚古生代中亚造山带构造域的影响,又经历了西太平洋构造域的叠加与改造(Wu *et al.*, 2007; Zhou *et al.*, 2009)。佳木斯地块由多种岩石类型构成,其中麻山杂岩、黑龙江杂岩、古生代花岗岩以及少量超基性岩体占主导地位(Wu *et al.*, 2007)。黑龙江杂岩,是指位于佳木斯地块西缘的构造混杂岩,主要由蓝片岩、绿片岩、斜长角闪岩、大理岩、超基性岩块、石英岩和云母片岩等组成(韩晓萌等, 2018),被认为是佳木斯地块与松嫩地块拼贴过程中形成的蛇绿构造混杂岩(李伟民等, 2020; 赵亮亮等, 2021),主要沿牡丹江断裂带分布于牡丹江、依兰和萝北等地区(葛茂卉等, 2020)。

蓝片岩和高压云母片岩作为依兰地区黑龙江杂岩的重要组成部分,其变质 P - T 条件研究广泛。早期主要通过蓝片岩的共生矿物组合和传统矿物温压计来估算出变质峰期 P - T

条件(白景文等, 1988; 曹熹等, 1992; 叶慧文等, 1994), 包括多硅白云母中 Si 的含量(Zhou *et al.*, 2009; 李伟民等, 2014), 钠质角闪石 Al(IV) 和 Al(VI) 含量(李蓉等, 2013)、石榴石-黑云母温度计及多硅白云母压力计(李蓉等, 2013)等, 研究结果表明蓝片岩峰期 P - T 条件为 $0.6 \sim 1.4 \text{ GPa}/350 \sim 550^\circ\text{C}$, 晚期温度为 $480 \sim 598^\circ\text{C}$, 反映绿片岩-角闪岩相变质作用叠加。近期研究多采用相平衡模拟(Perple_X、Thermocalc v3.50、GeoPS)和视剖面图来进一步精确限定 P - T 轨迹。温度范围与之前研究结果相近(韩晓萌等, 2018; Sun *et al.*, 2025), 但最近石榴石-铁冻蓝闪石片岩中硬柱石的发现指示了近高压的变质条件, 峰期压力达到 $1.64 \sim 1.83 \text{ GPa}$ (Sun *et al.*, 2025)。对蓝片岩通过锆石 U-Pb 定年测得其原岩形成时代为 $288 \pm 2 \text{ Ma} \sim 208 \pm 6 \text{ Ma}$ (周建波等, 2009, 2013; Zhu *et al.*, 2015; Ge *et al.*, 2016, 2017), 蓝片岩的变质年代研究主要通过金红石 U-Pb、多硅白云母和闪石的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年(李伟民, 2008; Li *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2011; 周建波等, 2013; Zhu *et al.*, 2017; Aouizerat *et al.*, 2019), 其变质年龄 $190 \pm 1 \text{ Ma} \sim 145 \pm 1 \text{ Ma}$ 表明与俯冲有关的高压变质作用发生在早侏罗世或之后。

相较于蓝片岩, 高压云母片岩变质作用 P - T 条件的研究较少, 李蓉等(2013)依据石榴石、黑云母及斜长石矿物化学成分计算出黑龙江杂岩中的石榴石二母片岩的峰期变质条件为 $0.68 \sim 0.95 \text{ GPa}/536 \sim 598^\circ\text{C}$ 。对云母片岩中多硅白云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 进行测年(Wu *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2009, 2011; 葛茂卉等, 2020)得到其变质年代为 $187 \pm 2 \text{ Ma} \sim 171 \pm 1 \text{ Ma}$, 与黑龙江杂岩蓝片岩的变质年代相近。

早期研究仅对原黑龙江杂岩内的个别地区的片岩或基性变质岩块进行了原岩恢复(曹熹等, 1992; 叶慧文等, 1994), 基本认为是一套蛇绿岩层序性质的构造混杂岩。孔凡梅(2010)提出黑龙江杂岩中普遍含有大洋富锰硅质岩。大量学者通过地球化学、Nd 同位素、稀土和微量元素的配分曲线以及构造判别图解等方法判别依兰地区黑龙江杂岩变基性岩原岩以 OIB 为主, 含少量 MORB(李伟民, 2008; 黄映聪, 2009; 孔凡梅, 2010; 赵亮亮, 2011; Ge *et al.*, 2016; 魏巍等, 2016; 韩晓萌, 2018), 其中魏巍等(2016)依据黑龙江杂岩中 MORB 玄武岩及同时代蛇纹岩同时产出认为这些玄武岩形成于大洋的洋脊扩张期。黑龙江杂岩云母片岩的原岩主要为页岩和泥岩等, 遭受强烈的韧性变形(黑龙江省地质矿产局, 1993; 葛茂卉等, 2019)。因此, 黑龙江杂岩包含蛇绿岩残块、洋岛/洋中脊玄武, 反映其形成于复杂的大洋环境, 并可能经历了洋盆扩张、俯冲及拼贴等过程。

2 野外产状及样品采集

本文研究样品采自黑龙江依兰地区的黑龙江杂岩。作为典型的蛇绿构造混杂岩, 依兰地区的黑龙江杂岩基质主要为一套强烈变形的长英质糜棱岩, 包括石英片岩、云母片岩

等, 岩块主要由具蛇绿岩性质的蛇纹石化橄榄岩、变辉长岩、变玄武岩、蓝片岩、硅质岩、大理岩组成, 各岩块常呈块状、透镜状产出。本文研究的含红帘石云母石英片岩(样品 24YL09-1)为一套特殊透镜体产在石英片岩中, 共同作为黑龙江杂岩的基质, 样品采自林场村北东向 2.8 km 处($\text{E}129^\circ 45'39''$ 、 $\text{N}46^\circ 15'23''$)。

3 分析方法

本文所有样品的矿物主量元素电子探针分析背散射图像等在北京大学教育部造山带与地壳演化重点实验室完成。电子探针型号为 JXA-8100, 实验条件为加速电压 15 kV , 束流 10 nA , 云母类矿物束斑为 $5 \mu\text{m}$, 其他矿物束斑为 $1 \mu\text{m}$ 。采用 PRZ 方法修正, 标准样品为美国 SPI 公司的 53 种矿物。

全岩主量元素在广州市拓岩检测技术有限公司测得。主量元素利用日本理学 Primus II X 射线荧光光谱仪(XRF)分析完成。用于 XRF 分析的样品处理流程如下:(1)将 200 目样品置于 105°C 烘箱中烘干 12 h ;(2)称取 $\sim 1.0 \text{ g}$ 烘干样品置于恒重陶瓷坩埚中, 在 1000°C 马弗炉中灼烧 2 h , 取出待冷却至室温再称量, 计算烧失量;(3)分别称取 6.0 g 助熔剂($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$: LiBO_2 : $\text{LiF} = 9:2:1$)、 0.6 g 样品、 0.3 g 氧化剂(NH_4NO_3)置于铂金坩埚中, 在 1150°C 熔样炉中熔融 14 min , 取出坩埚转移到耐火砖上冷却, 然后将玻璃片取出以备 XRF 测试。测试过程中以 GSR-3、GSD-4、GSD-6、OU-6、GSR-12、GSR-13、NOD-P-1 为标样, 监测测试结果的准确性, 测试结果 RSD 优于 5% 。微量元素利用赛默飞 iCAP RQ 完成。样品前处理流程如下:(1)将 200 目样品置于 105°C 烘箱中烘干 12 h ;(2)准确称取粉末样品 50 mg 置于 Teflon 溶样弹中;(3)先后依次缓慢加入 1 mL 高纯 HNO_3 和 1 mL 高纯 HF ;(4)将 Teflon 溶样弹放入钢套, 拧紧后置于 190°C 烘箱中加热 24 h 以上;(5)待溶样弹冷却, 开盖后置于 140°C 电热板上蒸干, 然后加入 1 mL HNO_3 并再次蒸干;(6)加入 1 mL 高纯 HNO_3 、 1 mL MQ 水和 1 mL 内标 Rh(浓度为 1×10^{-6}), 再次将 Teflon 溶样弹放入钢套, 拧紧后置于 190°C 烘箱中加热 12 h 以上;(7)将溶液转入聚乙烯料瓶中, 并用 2% HNO_3 稀释至 100 g 以备 ICP-MS 测试。测试过程中以一系列国标和国际标准位置作为标准样品, 监测数据结果的准确性, 数据结果 RSD 优于 5% 。

红帘石云母石英片岩样品激光片的制作在河北廊坊晨硕地质服务有限公司完成。使用 LA-ICP-MS 方法对红帘石片岩样品中的云母进行了矿物原位 Rb-Sr 定年, 测试在广州市拓岩检测技术有限公司完成, 测试中使用了 NWR 193nm 的 ArF 准分子激光烧蚀系统与型号与 Agilent 8900 四极杆型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)联用。

激光烧蚀在高纯度氦气中进行, 然后与氩气混合, 最后将样品引入 ICP-MS 中测试。反应气体 N_2O 被用来抑制荷质

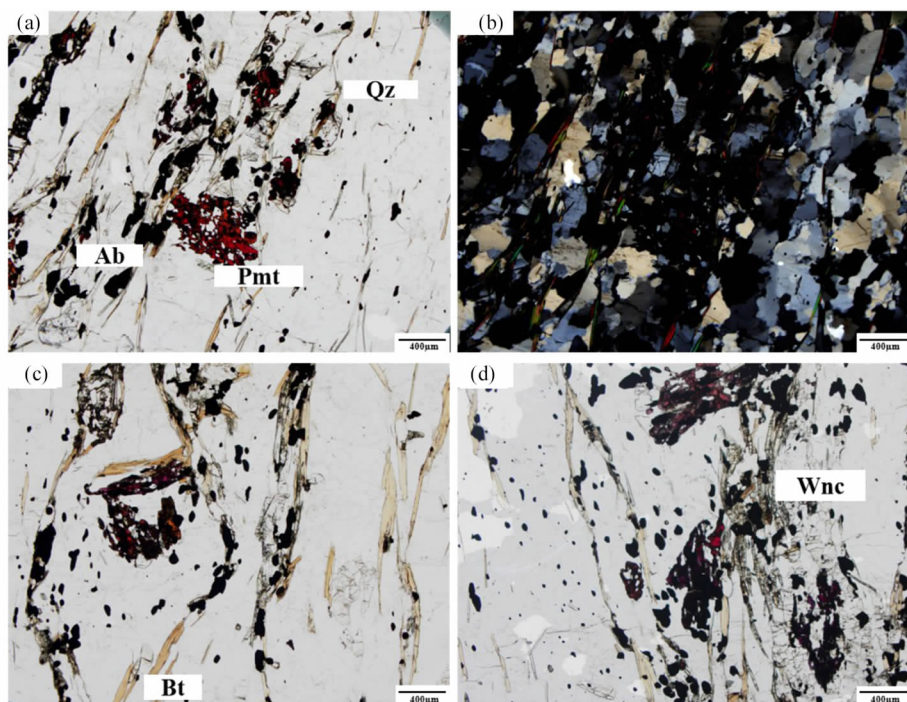


图2 黑龙江杂岩红帘石云母石英片岩(样品 24YL09-1)显微岩相学特征

(a、c、d)单偏光显微照片;(b)正交偏光显微照片. Qz-石英;Bt-黑云母;Ab-钠长石;Pmt-红帘石;Wnc-蓝透闪石

Fig. 2 Photographs of piemontite-mica-quartz schist (Sample 24YL09-1) of the Heilongjiang Complex

(a, c, d) plane polarized photomicrographs; (b) cross-polarized photomicrograph. Qz-quartz; Bt-biotite; Ab-albite; Pmt-piemontite; Wnc-winchite

比相同的元素干扰; N_2O 是一种高效的反应气体,能够与 Sr^+ 反应生成 SrO^+ 离子,但与 Rb^+ 不反应。在烧蚀 BHVO-2G 和 Mica-Mg 的同时,通过增加反应池中 N_2O 的流速和监测 Sr^+ 和 SrO^+ 的灵敏度来优化反应速率。在25%~27%的流量(0.25~0.27mL/min的 N_2O)下, SrO^+ 信号在 Rb^+ 信号中无显著损失而达到最大。在测量样品之前,将 N_2O 连接到iCAP TQ中的第4个质量流量控制器中,并以25%的流速(0.25mL/min的 N_2O)吹扫管线2h以保持仪器的稳定性,同时该过程可冲洗掉气体杂质并使系统饱和,从而最大限度地减少由于反应速率变化引起的漂移。然后使用光斑尺寸30 μm 、脉冲频率10Hz、能量密度3.5J/cm²的激光以线扫描方式烧蚀NIST SRM 610来调节透镜和晶胞参数以最大化灵敏度。分析样品时使用光斑尺寸110 μm 、能量密度是3.5J/cm²和频率8Hz的激光脉冲。每个分析包括30s的背景采集,然后是120s的消融和30s的清洗,驻留时间50ms用于分析Sr的质量和数量偏移同位素(⁸⁶Sr、⁸⁷Sr和⁸⁸Sr、⁸⁶Sr¹⁶O、⁸⁷Sr¹⁶O和⁸⁸Sr¹⁶O)和⁸⁵Rb。测试完成后原始数据离线导出,整个数据处理过程使用Excel宏程序执行。

4 岩相学特征

红帘石云母石英片岩,主要矿物包括帘石族矿物(10%)、黑云母(10%)、闪石族矿物(5%),钠长石和钾长石

(5%)、石英(60%)和不透明矿物(10%)。黑云母定向排列构成了主要片理(图2)。红帘石及斜黧帘石,呈粒状、柱状集合体,鲜红色-橙黄色多色性,干涉色由于矿物本身颜色的叠加而呈红色,周围伴生闪锌矿和铁氧化物等不透明副矿物。帘石类矿物成分为 $\text{Si} = 3.77 \sim 3.82 \text{ p. f. u.}$, $\text{Al} = 2.55 \sim 2.77 \text{ p. f. u.}$, $\text{Ca} = 2.36 \sim 2.42 \text{ p. f. u.}$, $\text{Mn} = 0.45 \sim 0.54 \text{ p. f. u.}$ 。 $X_{\text{ps}}(\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+} + \text{Al}))$ 介于0.03~0.07之间。根据潘兆槽(1993)分类图解(图3a)表明样品中的帘石以红帘石和斜黧帘石为主。闪石为钠-钙质闪石(图3b),有两种,蓝透闪石, $\text{Si} = 7.98 \sim 8.00 \text{ p. f. u.}$, Na^{M4} 值介于0.56~0.93, $(\text{Na} + \text{K})^{\text{A}}$ 值介于0.00~0.06;镁钠钙闪石, $\text{Si} = 7.57 \sim 7.65 \text{ p. f. u.}$, Na^{M4} 值介于0.87~1.04, $(\text{Na} + \text{K})^{\text{A}}$ 值介于0.69~1.17。黑云母,浅黄色-黄褐色多色性, $X_{\text{Mg}}(\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})) = 0.88 \sim 0.89$, $\text{Ti} = 0.06 \sim 0.07 \text{ p. f. u.}$ 。长石主要有钠长石和钾长石两种,表面发生蚀变而浑浊,其中钠长石的Ab值($\text{Na}/(\text{Na} + \text{Ca} + \text{K})$)为0.91~1.00,钾长石的Or值($\text{K}/(\text{Na} + \text{Ca} + \text{K})$)为0.97~0.98。代表性矿物化学成分如表1所示。

5 变质作用P-T条件

为深入探讨依兰地区黑龙江杂岩红帘石云母石英片岩的变质演化过程,本文在(Mn)NCKFMASHTO体系下对红帘石云母石英片岩开展P-T视剖面图计算。由于石英的大量

表 1 依兰地区黑龙江杂岩红帘石云母石英片岩代表性矿物电子探针成分 (wt%)

Table 1 Electron microprobe composition (wt%) of representative minerals in piemontite-mica-quartz schist of Heilongjiang Complex in the Yilan area

样品号	24YL09-1										
	红帘石			蓝透闪石		镁钠钙闪石		黑云母		钾长石	钠长石
矿物											
SiO ₂	36.50	36.94	37.30	56.89	56.71	53.55	53.95	41.87	42.25	64.22	67.61
TiO ₂	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.06	0.08	1.30	1.36	0.00	0.03
Al ₂ O ₃	21.94	21.12	22.67	1.38	0.37	2.20	2.31	13.99	14.12	19.81	20.87
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.01	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36
Fe ₂ O ₃	2.078	2.56	2.08	6.36	4.90	8.14	6.23	0.00	0.00	0.23	0.09
FeO	3.04	3.73	2.98	1.27	0.00	8.22	6.94	4.22	3.96	0.00	0.00
MnO	5.72	6.30	5.92	2.43	7.88	1.45	1.60	3.40	3.84	0.12	0.01
MgO	0.13	0.10	0.14	19.17	18.76	7.23	8.81	18.32	18.14	0.28	0.00
CaO	21.86	21.95	22.06	4.95	2.01	9.39	11.30	0.03	0.02	0.06	0.07
Na ₂ O	0.01	0.02	0.01	3.53	1.98	7.42	6.30	0.03	0.07	0.34	11.12
K ₂ O	0.00	0.04	0.00	0.16	0.07	0.01	0.02	10.15	9.75	15.89	0.11
Total	91.60	92.57	92.95	95.51	92.24	96.86	96.91	93.32	93.52	100.97	100.27
O	12.50	12.50	12.50	23.00	23.00	23.00	23.00	11.00	11.00	8.00	8.00
Si	3.80	3.79	3.77	7.99	8.00	7.58	7.65	3.06	3.07	2.94	2.95
Ti	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.07	0.07	0.00	0.00
Al	2.65	2.55	2.70	0.23	0.06	0.37	0.39	1.20	1.21	1.07	1.07
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Fe ³⁺	0.16	0.20	0.16	0.67	0.54	0.87	0.67	0.00	0.00	0.01	0.00
Fe ²⁺	0.26	0.32	0.25	0.15	0.00	0.97	0.82	0.26	0.24	0.00	0.00
Mn	0.50	0.55	0.51	0.29	0.97	0.87	1.06	0.21	0.24	0.01	0.00
Mg	0.02	0.02	0.02	4.01	4.06	1.98	2.39	1.99	1.96	0.019	0.00
Ca	2.40	2.41	2.39	0.74	0.31	1.13	0.96	0.00	0.00	0.01	0.01
Na	0.00	0.00	0.00	0.96	0.56	2.04	1.73	0.00	0.01	0.03	0.94
K	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.95	0.90	0.93	0.001
Sum	8.21	8.25	8.21	15.29	14.92	15.81	15.68	7.75	7.71	5.00	4.98

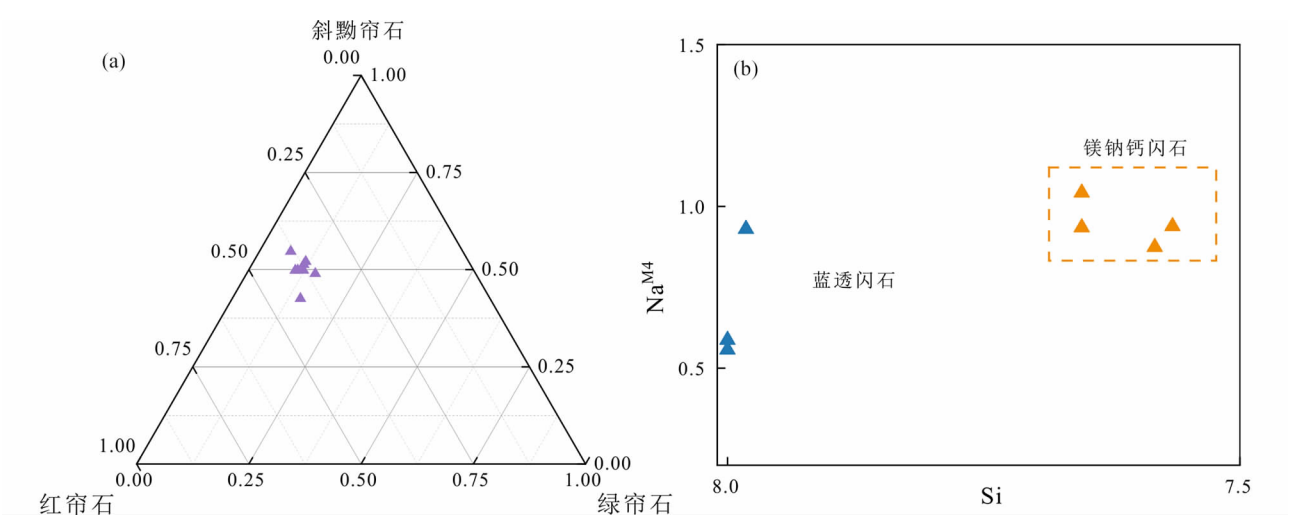


图 3 黑龙江杂岩红帘石云母石英片岩的矿物成分图解

(a) 帘石分类投图(潘兆橐, 1993); (b) 闪石分类投图(Leake *et al.*, 1997)

Fig. 3 Mineral composition diagrams of piemontite-mica-quartz schist sample of the Heilongjiang Complex

(a) Classification of epidote (Pan, 1993); (b) Classification of amphibole (Leake *et al.*, 1997)

出现,将其作为过量组成,假设流体相为纯水,固相线以下设水过量,在固相线以上设熔体过量。视剖面图的计算利用 GeoPS 程序进行,用到的矿物模型如下:白云母(White *et al.*, 2005)、闪石(Diener *et al.*, 2007)、绿泥石(Holland *et al.*, 1998)、

表 2 依兰地区黑龙江杂岩红帘石云母石英片岩视剖面图所用主量元素 (mol/mol)

Table 2 Bulk-rock composition (mol/mol) used in the *P-T* pseudosection calculation for the piemontite-mica-quartz schist of the Heilongjiang Complex in Yilan area

视剖面图	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	FeO	TiO ₂	MnO	O ₂
NCKFMASHTO (图 4)	0.63	1.21	1.37	89.20	0.26	0.38	4.83	0.09	0.00	0.36
MnNCKFMASHTO (图 5)	0.69	1.06	1.28	90.45	0.32	0.37	4.05	0.09	0.02	0.56

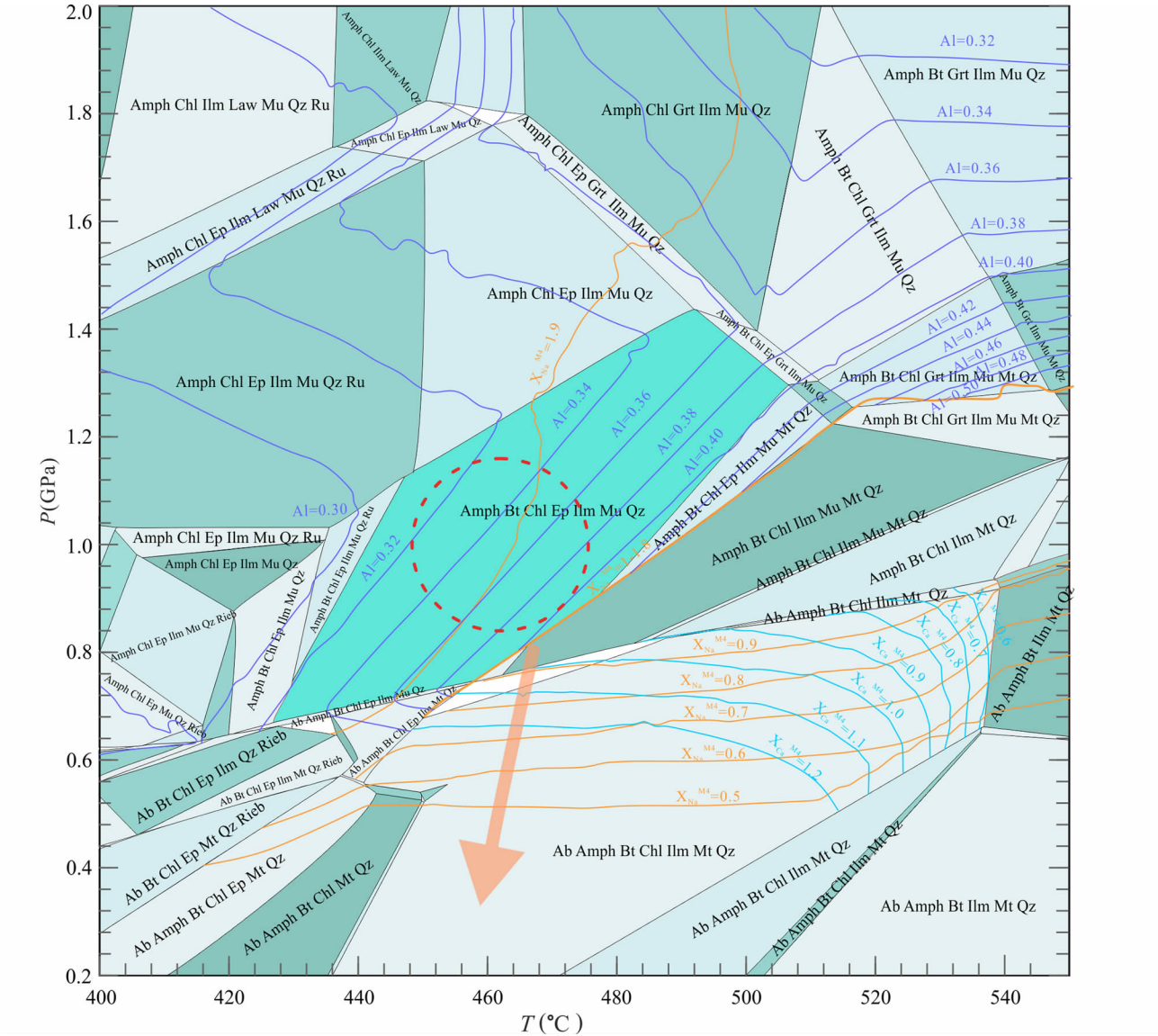


图 4 红帘石云母石英片岩 (样品 24YL09-1) 在 NCKFMASHTO 体系下的 *P-T* 视剖面图

蓝透闪石及镁钠钙闪石, X_{Na}^{M4} 为 M4 占位的 Na 含量; X_{Ca}^{M4} 为 M4 占位的 Ca 含量; Al: 闪石中 Al 的含量

Fig. 4 *P-T* pseudosection for piemontite-mica-quartz schist (Sample 24YL09-1) in NCKFMASHTO system

Winchite and magnesio-hornblende, X_{Na}^{M4} is the Na content occupied by M4; X_{Ca}^{M4} is the Ca content occupied by M4; Al: the content of Al in amphibole

绿帘石 (Holland and Powell, 1998)、黑云母、石榴子石 (White *et al.*, 2005) 和斜长石 (Holland and Powell, 1998, 2003)。硬柱石和石英为纯端元。其中 O 的含量是通过岩石中各矿物成分电价平衡的方式进行估算得到的。

此外, 由于目前没有红帘石的矿物热力学模型, 本文采用不含 Mn 的绿帘石模型, 并结合有效全岩成分更正了体系 MnO 含量。为更好的限定红帘石云母石英片岩的温度压力条件, 分别在 MnNCKFMASHTO (Mn-Na₂O-CaO-K₂O-FeO-

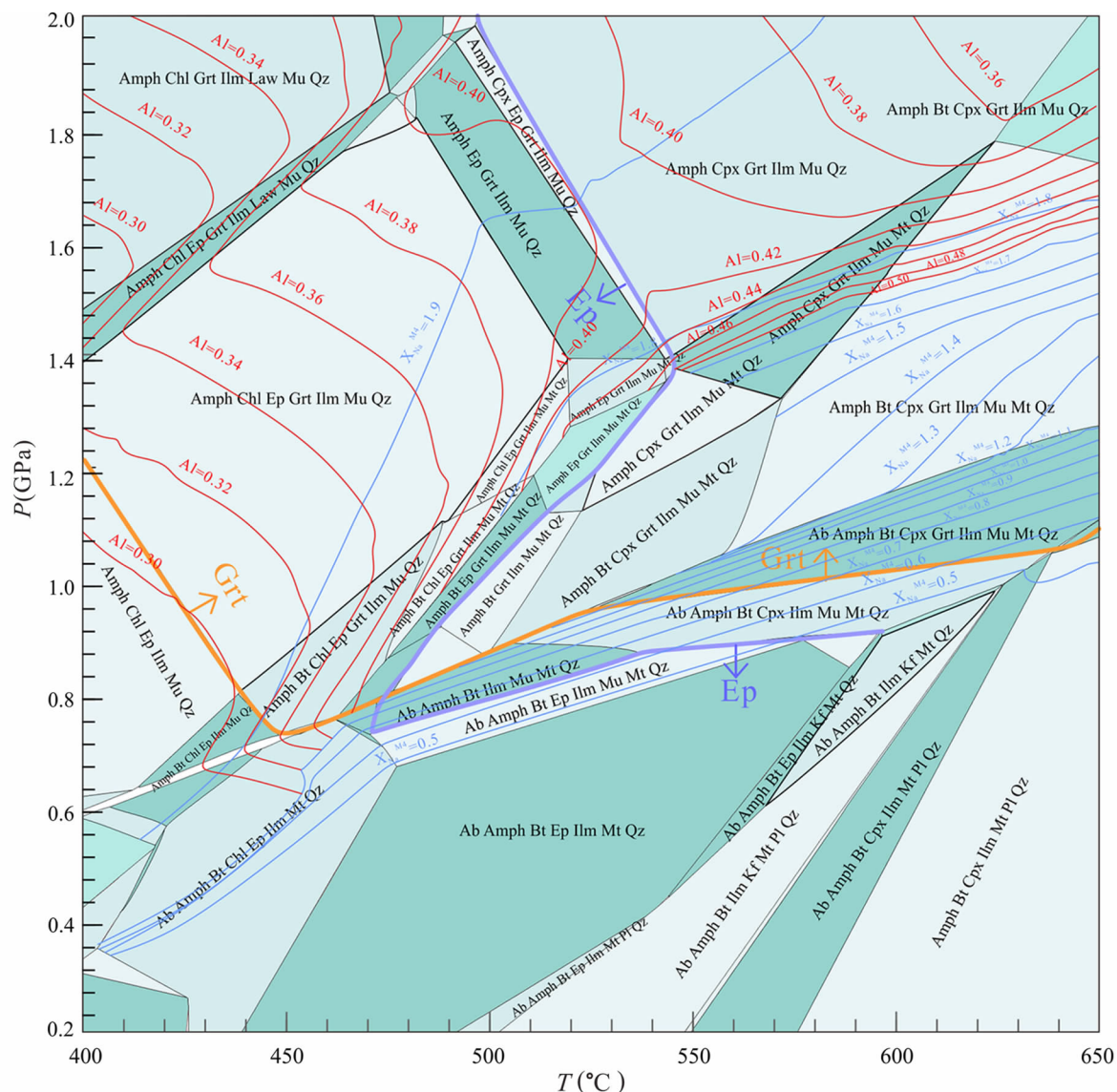


图5 红帘石云母石英片岩(样品 24YL09-1)在 MnNCKFMASHTO 体系下的 P - T 视剖面图

Fig. 5 P - T pseudosection for piemontite-mica-quartz schist (Sample 24YL09-1) in MnNCKFMASHTO system

$\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O-TiO}_2\text{-O}$) 和 NCKFMASHTO ($\text{Na}_2\text{O-CaO-K}_2\text{O-FeO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O-TiO}_2\text{-O}$) 体系对样品开展相平衡模拟以阐明 MnO 体系对矿物组合稳定域的影响。所用的岩石成分如表 2 所示。

红帘石云母石英片岩样品(24YL09-1)在 NCKFMASHTO 体系下的 P - T 视剖面图如图 4 所示。视剖面图展示了矿物成分等值线,如闪石中 Na 在 M4 占位的值 $X_{\text{Na}}^{\text{M4}}$ 、Ca 在 M4 占位的值 $X_{\text{Ca}}^{\text{M4}}$ 和闪石中 M2 位置的 Al 的含量。样品观察到的峰期矿物组合对应相图 $\text{Ep} + \text{Amph} + \text{Bt} + \text{Mu} + \text{Chl} + \text{Mt} + \text{Qtz} + \text{Ilm}$ 组合,其稳定在 $0.6 \sim 1.4 \text{ GPa}/420 \sim 510^\circ\text{C}$ 。在观察到的矿物组合区域中, $X_{\text{Na}}^{\text{M4}}$ 值在相图中主要随着压力的升高而升高, $X_{\text{Ca}}^{\text{M4}}$ 值主要随着温度的升高而降低, M2 位置 Al 的含量随着温度的升高而升高。测得的闪石中 $\text{Al} = 0.34 \sim$

0.36 p. f. u 和 $X_{\text{Na}}^{\text{M4}}$ 的最大值(1.9)进一步限定 P - T 条件为 $0.8 \sim 1.1 \text{ GPa}/440 \sim 470^\circ\text{C}$ 。闪石成分 $X_{\text{Ca}}^{\text{M4}}$ ($1.0 \rightarrow 1.2$) 值的升高 $X_{\text{Na}}^{\text{M4}}$ ($0.8 \rightarrow 0.5$) 值的降低指示压力从 0.8 GPa 降低到 0.5 GPa 。由于最终减压组合中帘石矿物得以保留,因此退变质阶段可能经历近等温减压的 P - T 轨迹。

在 MnNCKFMASHTO 体系下 P - T 视剖面图如图 5 所示。与不含 Mn 体系的视剖面图相比,石榴石的稳定域向低温低压方向扩展,在压力大于 $0.7 \sim 1.2 \text{ GPa}$ 以上即可出现,而绿帘石稳定域也有一定程度增加,分布在 $P < 2.0 \text{ GPa}$ 、 $T < 550^\circ\text{C}$ 的条件下,相对于图 4 ($T < 516^\circ\text{C}$)。与不含 Mn 体系的视剖面图相比,闪石的 $X_{\text{Na}}^{\text{M4}}$ 含量等值线、M2 位置的 Al 的含量等值线没有明显变化。

表 3 依兰地区黑龙江杂岩红帘石云母石英片岩全岩主量元素分析结果 (wt%)

Table 3 Major element compositions (wt%) of the piemontite-mica-quartz schist of the Heilongjiang Complex in Yilan area, China

样品号	24YL09-1	24YL09-2	24YL09-3
SiO ₂	86.83	82.27	84.81
TiO ₂	0.11	0.17	0.17
Al ₂ O ₃	2.27	3.62	3.62
Fe ₂ O ₃	6.00	7.26	6.23
FeO	0.22	0.35	0.04
MnO	0.88	0.90	1.77
MgO	0.79	1.16	0.76
CaO	0.85	1.17	0.59
Na ₂ O	0.63	1.04	0.65
K ₂ O	0.40	0.62	0.52
P ₂ O ₅	0.38	0.54	0.11
LOI	0.57	0.78	0.71
Total	99.95	99.88	99.97

6 全岩主量地球化学与年代学

红帘石云母石英片岩全岩主量元素分析结果表明(表 3),该岩石整体呈现高硅、富铁锰和低铝的特征,其中 SiO₂ 含量介于 82.27% ~ 86.83% 之间,Fe₂O₃ 含量为 6.00% ~ 7.26%,MnO 含量高达 0.88% ~ 1.77%,但 Al₂O₃ 含量仅为 2.27% ~ 3.62%,整体处于较低水平,与典型的陆源碎屑沉积岩存在显著差异。为进一步约束该岩石形成的构造环境,本次研究采用 Fe₂O₃/TiO₂-Al₂O₃/(Fe₂O₃ + Al₂O₃) 与 Fe₂O₃/(100-SiO₂)-Al₂O₃/(100-SiO₂) 构造环境判别图解开展投图分析。在 Fe₂O₃/TiO₂-Al₂O₃/(Fe₂O₃ + Al₂O₃) 图解中(图 6),所有红帘石云母石英片岩样品均完整落在洋中脊构造环境区域内,明确指示了该套岩石形成与洋中脊构造环境存在密切的成因联系;在 Fe₂O₃/(100-SiO₂)-Al₂O₃/(100-SiO₂) 图解中(图 7),2 件样品投点位于洋中脊构造环境区域,1 件样品投点落在洋中脊至大陆边缘的过渡区域内,进一步验证了该套岩石的洋中脊相关成因属性。

本文样品的主量元素特征与日本三波川增生杂岩中产出的洋中脊热液成因铁锰质岩、东太平洋海隆及胡安·德富卡海岭附近的现代洋中脊金属沉积物的主量元素组成特征相似(Fujinaga *et al.*, 2022; Kato *et al.*, 2011)。已有大量研究证实,海底热液活动喷流形成的铁羟基氧化物,可从周围海水中有有效吸附铁、锰等多种金属元素,是洋中脊热液成因铁锰质岩、金属沉积物的核心物质来源(Sherrell *et al.*, 1999)。本次研究的红帘石云母石英片岩中显著富集的铁、锰组分,可能代表该类热液沉积作用的直接产物,与洋中脊热液活动存在密切的成因联系,可与全球范围内洋中脊相关的海底热液成因铁锰质岩以及金属沉积物对比,表明该岩石形成于洋中脊附近的海底热液活动环境。

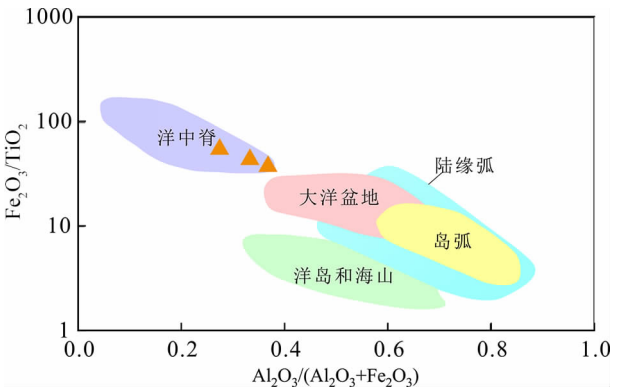


图 6 红帘石云母石英片岩的全岩 Fe₂O₃/TiO₂-Al₂O₃/(Fe₂O₃ + Al₂O₃) 图解(据张立杨, 2023)

Fig. 6 Diagram of whole-rock Fe₂O₃/TiO₂ vs. Al₂O₃/(Fe₂O₃ + Al₂O₃) for piemontite-mica-quartz schist (after Zhang, 2023)

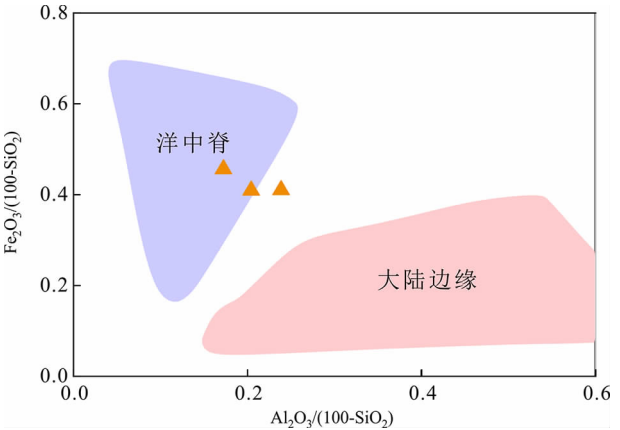


图 7 红帘石云母石英片岩的全岩 Fe₂O₃/(100-SiO₂)-Al₂O₃/(100-SiO₂) 图解(据张立杨, 2023)

Fig. 7 Diagram of whole-rock Fe₂O₃/(100-SiO₂) vs. Al₂O₃/(100-SiO₂) for piemontite-mica-quartz schist (after Zhang, 2023)

红帘石云母石英片岩(20YL09-2)中黑云母呈定向排列,构成岩石的主要片理,显微岩相学观察和相平衡模拟结果均表明黑云母与红帘石平衡共生,代表同一阶段变质作用的产物,因此对样品中的黑云母进行同位素定年可获取变质作用发生的时代。本次研究对薄片中的黑云母进行了 29 组原位 Rb-Sr 同位素测定,结果见表 4。这些黑云母的⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 比值为 191.58 ~ 1392.45,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值为 1.14 ~ 4.03;基于该组数据获得的等时线年龄为 149 ± 1 Ma (n = 29, MSWD = 1.2),对应的初始⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值为 0.699 ± 0.031(图 8),可能代表红帘石云母石英片岩的变质时代。由于黑云母 Rb-Sr 体系的封闭温度仅为 280 ~ 300℃(Dodson, 1973),考虑到该样品的峰期温度为 420 ~ 470℃,因此,该年龄应记录退变质

表 4 依兰地区黑龙江杂岩红帘石云母石英片岩部分黑云母原位 Rb-Sr 定年数据表

Table 4 In situ Rb-Sr geochronology of biotites from the piemontite-mica-quartz schist in the Heilongjiang Complex in Yilan area

测点号	同位素比值				年龄 (Ma)
	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	2σ	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ	
YL09-2. 01	191. 58	7. 68	1. 14	0. 02	156. 21
YL09-2. 02	447. 27	10. 35	1. 70	0. 05	145. 13
YL09-2. 04	920. 55	37. 93	2. 77	0. 09	151. 65
YL09-2. 05	377. 05	7. 20	1. 51	0. 03	144. 35
YL09-2. 10	536. 91	10. 22	1. 88	0. 04	149. 84
YL09-2. 15	268. 82	3. 55	1. 32	0. 02	153. 17
YL09-2. 19	522. 70	10. 50	1. 97	0. 04	155. 27
YL09-2. 22	315. 67	6. 09	1. 43	0. 03	154. 00
YL09-2. 23	522. 64	8. 30	1. 89	0. 04	152. 80
YL09-2. 25	1392. 45	70. 04	4. 03	0. 20	162. 99

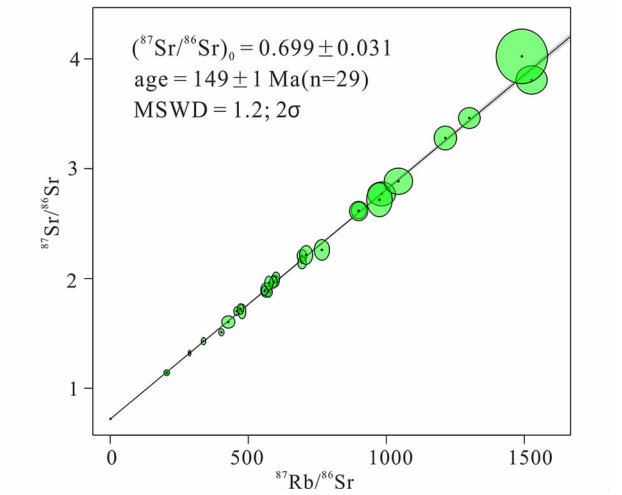


图 8 红帘石云母石英片岩 (样品 24YL09-2) 中黑云母 Rb-Sr 等时线年龄

Fig. 8 Rb-Sr isochron age of biotite in the piemontite-mica-quartz schist (Sample 24YL09-2)

阶段的冷却年龄。

7 讨论

7.1 红帘石云母石英片岩的原岩特征与形成环境

全岩地球化学成分分析表明,红帘石云母石英片岩的SiO₂ 含量均大于 80%,推断所采的红帘石云母石英片岩样品属于硅质岩。硅质岩的成因,主要有生物化学沉积成因、火山沉积成因和热液成因等观点。由于后期成岩作用对硅质岩原始组构存在改造的可能性,矿物学证据难以直接、可靠地指示其成因,因此,地球化学分析成为判别硅质岩成因的主要手段 (Bruce and Percival, 2014; Hara *et al.* , 2010)。

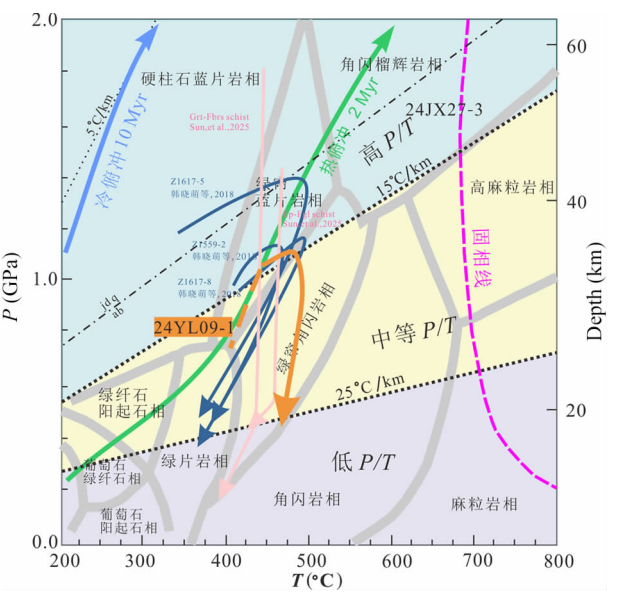


图 9 依兰地区黑龙江杂岩岩石变质演化 P - T 轨迹

24YL09-1 (红帘石云母石英片岩) 为本研究样品。Z1617-8 (石榴冻蓝闪石片岩)、Z1617-5 (绿帘绿帘闪石片岩) 和 Z1559-2 (白云母蓝闪石片岩) 为韩晓萌等 (2018) 研究样品。Ep-Fgl schist (绿帘石-铁蓝闪石片岩) 和 Grt-Fbrs schist (石榴石-铁冻蓝闪石片岩) 为 Sun *et al.* (2025) 研究样品

Fig. 9 Metamorphic P - T paths of the Heilongjiang Complex in Yilan area

24YL09-1 (piemontite-mica-quartz schist) is the sample analyzed in this study. Z1617-8 (garnet-barroisite schist), Z1617-5 (chlorite-epidote-glaucophane schist), and Z1559-2 (muscovite-glaucophane schist) were studied by Han *et al.* (2018). The Ep-Fgl schist (epidote-ferroglaucophane schist) and Grt-Fbrs schist (garnet-ferrobarroisite schist) were investigated by Sun *et al.* (2025)

在硅质岩的沉积环境中,热液的参与导致其富集铁 (Fe) 和锰 (Mn),而陆源物质的输入为铝 (Al) 和钛 (Ti) 的富集提供了物质来源。岩相学和矿物化学分析表明,依兰地区黑龙江杂岩红帘石云母石英片岩富含铁和锰,红帘石云母石英片岩的形成与热液活动有关 (许汉华等, 2023)。

硅质岩的沉积环境决定了其硅质来源、物理化学条件以及沉积速率,这些因素又会在硅质岩的地球化学特征中得以体现。因此,借助硅质岩的地球化学特征,能够有效地对其沉积环境进行约束 (冯彩霞, 2011)。根据样品投在 Fe₂O₃/TiO₂-Al₂O₃/(Fe₂O₃ + Al₂O₃) 和 Fe₂O₃/(100-SiO₂)-Al₂O₃/(100-SiO₂) 两个图解的区域 (图 6、图 7),指示红帘石样品的形成环境为洋中脊。

7.2 变质演化

相平衡模拟可以有效地重现黑龙江杂岩红帘石云母石英片岩的变质 P - T 演化,研究结果显示红帘石云母石英片岩样品记录了峰期变质阶段和后期的降温降压退变质阶段 (图 9)。

(1) 进变质阶段。在红帘石云母石英片岩中未发现保存的早期矿物组合以及矿物成分,因此无法限定峰期前的温压条件,推测样品进变质阶段的脱水反应达到近完全平衡。

(2) 峰期变质阶段。红帘石云母石英片岩保留了峰期矿物组合为 $\text{Ep} + \text{Amph} + \text{Bt} + \text{Mu} + \text{Chl} + \text{Mt} + \text{Qz} + \text{Ilm}$, 该组合在视剖面图中稳定的 P - T 范围较宽, 为 $0.6 \sim 1.4 \text{ GPa}/420 \sim 510^\circ\text{C}$, 进一步限定峰期条件需要通过矿物成分等值线。由于模拟使用的热力学数据库缺少绿帘石含 Mn 模型, 因此无法通过红帘石成分来约束峰期 P - T 条件。通过不含 Mn 和含 Mn 的模型分别计算视剖面图, 可以评估模拟体系中 MnO 成分对平衡矿物相关的影响, 结果表明 Mn 的加入可显著影响石榴石的稳定域, 使得石榴石向低压方向稳定, 但对不含 Mn 的闪石的稳定域及闪石成分几乎无影响, 因此可以用闪石成分来约束岩石的峰期 P - T 条件: 闪石中 Al 含量 (0.34) 和 $X_{\text{Na}}^{\text{Mn}}$ 的最大值共同限定了峰期的 P - T 条件为 $0.8 \sim 1.1 \text{ GPa}/440 \sim 470^\circ\text{C}$ 。由于含 Mn 视剖面图中使用绿帘石模型不含 Mn, 因此在含 Mn 视剖面图中的石榴子石出现的压力 $\sim 0.8 \text{ GPa}$ 可能代表了其稳定的下限, 这与本文获得的峰期 P - T 条件是相吻合的。

(3) 降温降压退变质阶段。岩石在退变质过程的反应往往伴随流体参与, 多表现为吸水反应 (Shao and Wei, 2011)。红帘石云母石英片岩中没有出现退变质矿物组合, 这可能与退变质体系中水不饱和有关。仅有少量矿物成分环带记录了晚期的退变质过程, 如闪石中 $X_{\text{Ca}}^{\text{Mn}}$ 的升、高 $X_{\text{Na}}^{\text{Mn}}$ 的降低, 指示表明压力从 0.8 GPa 降低到 0.5 GPa , 可能指示了近等温减压的退变质过程。

7.3 构造意义

佳木斯地块与松嫩地块的碰撞-拼合历史是东北亚大地构造研究的关键问题之一, 目前学术界存在多种认识: (1) 古生代晚期-早中生代拼合。该观点认为兴安与松嫩地块拼合后 (晚石炭世; 王粉丽等, 2017), 与佳木斯地块在晚古生代 (二叠纪) 至早中生代 (三叠纪-早侏罗世) 期间完成拼合, 与古亚洲洋/牡丹江洋的闭合有关 (赵亮亮和张兴洲, 2011; 周建波等, 2018; 李锦铁等, 1999; 刘永江等, 2010)。黑龙江杂岩中高压变质岩的变质年龄 ($190 \sim 140 \text{ Ma}$) 被解释为碰撞或后期抬升事件 (Li *et al.*, 2009, 2011; 周建波等, 2013; 葛茂卉等, 2020); (2) 中生代中期 (侏罗纪-早白垩世) 拼合, 部分学者认为该事件与古太平洋板块的俯冲有关 (李伟民等, 2014), 而另一些学者则将其归因于蒙古-鄂霍茨克洋闭合的远程效应 (Zhou and Li, 2017), 还有一些学者认为佳木斯地块原属东冈瓦纳大陆北缘, 记录了新元古代-早古生代罗迪尼亚超大陆裂解和冈瓦纳陆块聚合相关的泛非期变质-岩浆事件, 该地块于早古生代末裂离冈瓦纳陆块, 向北漂移后于早侏罗世与亚洲东缘碰撞, 形成黑龙江杂岩, 并最终拼贴为中亚造山带东段组成部分 (Wu *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2018; 华永成等, 2019); (3) 多期拼合与叠加改造 (颜顽强

等, 2008; 许文良等, 2012; Zhu *et al.*, 2015)。两地块经历了拼合-裂解-再拼合的复杂过程: 在早古生代完成拼贴, 伴随晚古生代末期古亚洲洋闭合, 三叠纪早期沿牡丹江断裂再次发生裂解, 早-中侏罗世再次拼合, 解决上述争议的关键在于明确黑龙江杂岩的变质时代及其成因。

依兰地区黑龙江杂岩红帘石云母石英片岩原岩为富铁和锰的硅质岩, 其地球化学特征显示为大洋板块的洋中脊型。洋中脊型硅质岩通常与蛇绿岩套密切相关, 其成因往往受海底热液活动和岩浆作用的共同影响, 并且随着距洋中脊距离的增加, 海底岩浆与热液作用的影响会逐渐减小 (牛鹏, 2021)。这套红帘石云母石英片岩在依兰地区黑龙江杂岩基岩中的分布十分局限, 与区域内大面积发育的石英岩和云母片岩相比, 其原岩形成的构造位置可能更靠近洋中脊区域, 代表洋中脊附近受热液流体交代的沉积物。

红帘石云母石英片岩和依兰地区已经报道的蓝片岩岩石的峰期条件均表现为典型的低温高压变质特征, 其 P - T 轨迹呈顺时针“发卡”型, 对应完整的俯冲-折返动力学过程。与依兰地区蓝片岩相比, 红帘石云母石英片岩的峰期 P - T 条件要明显偏低 (白景文等, 1988; 曹熹等, 1992; 叶慧文等, 1994; Zhou *et al.*, 2009; 李伟民等, 2014; 李蓉等, 2013), 这些差异有两种可能的解释: (1) 不同洋壳物质在同一俯冲隧道中达到不同深度后折返并在浅部发生构造拼贴; (2) 持续俯冲过程中不同阶段的产物。很多学者通过对依兰地区的蓝片岩开展了不同方法的定年研究, 例如, 金红石 U-Pb 定年获得了 $180 \sim 172 \text{ Ma}$ 的年龄结果, 由于 U-Pb 体系封闭温度较高 (约 $500 \sim 600^\circ\text{C}$), 该年龄范围被认为代表高压岩石近峰期的变质时代; 蓝片岩中多硅白云母 Ar-Ar 定年显示年龄集中在 $175 \sim 165 \text{ Ma}$, 由于 Ar-Ar 体系封闭温度在 $\sim 400^\circ\text{C}$ 左右, 因此该年龄记录了期后的冷却年龄。本文在红帘石云母石英片岩中获得的黑云母 Rb-Sr 年龄明显晚于上述年龄, 同样可能有不同解释: (1) 由于黑云母 Rb-Sr 体系封闭温度比 Ar-Ar 体系更低, 该年龄可能记录更晚阶段的抬升冷却过程; (2) 红帘石云母石英片岩的整体变质时代可能晚于蓝片岩, 代表更晚阶段的俯冲产物。值得注意的是, 本文中红帘石云母石英片岩的峰期 P - T 条件指示较高的 P/T 比值 ($12 \sim 15^\circ\text{C}/\text{km}$), 代表相对较高的地热梯度, 可能受控于较小的俯冲角度、较热新生洋壳 (Syracuse *et al.*, 2010), 这与依兰地区报道的典型冷俯冲型 ($< 10^\circ\text{C}/\text{km}$) 的蓝片岩明显不同, 因此本文倾向于认为这套红帘石云母石英片岩的变质时代可能稍晚。不论哪种解释, 这些年龄均表明在侏罗纪期间, 依兰地区存在活动的俯冲带, 大洋板块正在向下俯冲, 并将洋壳和沉积物拖拽至高压低温深度。这直接证明了古太平洋板块向欧亚大陆之下的俯冲作用在早侏罗世 ($\sim 180 \text{ Ma}$) 已经强烈影响到了中国东北地区。

8 结论

依兰地区黑龙江杂岩红帘石云母石英片岩的矿物组合

包括红帘石 (Pmt)、斜黝帘石 (Ep)、石英 (Qz)、蓝透闪石 (Wnc)、镁钠钙闪石 (Amph)、黑云母 (Bt)、多硅白云母 (Mu)、钠长石 (Ab) 和钾长石 (Kfs), 其中红帘石和多硅白云母作为特征变质矿物的出现, 指示该岩石经历了低温高压变质作用。基于 (Mn) NCKFMASHTO 体系的相平衡模拟显示, 红帘石云母石英片岩的峰期变质条件为 $0.8 \sim 1.1 \text{ GPa}/440 \sim 470^\circ\text{C}$, 并经历了峰后的降温降压过程。红帘石云母石英片岩的原岩为洋中脊环境下受海底热液活动影响的富铁锰硅质岩, 黑云母 Rb-Sr 同位素记录了 $\sim 150 \text{ Ma}$ 的变质年龄。依兰地区黑龙江杂岩的红帘石云母石英片岩、云母片岩及蓝片岩均具有典型的低温高压变质特征, 其变质作用与古太平洋板块在早中生代 (早侏罗世) 开始向西俯冲导致的佳木斯地块-松辽地块的碰撞拼合作用直接相关。

致谢 中国地质调查局天津地质调查中心王惠初研究员、孙立新研究员在野外工作中给予了大力支持。感谢两位审稿人对本文提出的宝贵意见。

References

- Aouizerat A, Xiao WJ, Schulmann K, Jeřábek P, Monié P, Zhou JB, Zhang JJ, Ao SJ, Li R, Li YC and Esmaili R. 2019. Structures, strain analyses, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of blueschist-bearing Heilongjiang Complex (NE China): Implications for the Mesozoic tectonic evolution of NE China. *Geological Journal*, 54 (2): 716-745
- Bai JW, Wang WX and Zhang HR. 1988. Character of glaucophane schists in metamorphic zone in Yilan, Mudanjiang, Heilongjiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 7 (4): 298-308 (in Chinese with English abstract)
- Bruce MC and Percival IG. 2014. Geochemical evidence for provenance of Ordovician cherts in southeastern Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 61 (7): 927-950
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Heilongjiang Province. 1993. Regional Geology of Heilongjiang Province. Beijing: Geological Publishing House, 1-734 (in Chinese)
- Cao X, Dang ZX, Zhang XZ, Jiang JS and Wang HD. 1992. Jiamusi Composite Terrane. Changchun: Jilin Science & Technology Publishing House, 1-224 (in Chinese)
- Chen XH, Yao Y, Yue YH, Kuang SY, Li J and Song YP. 2024. Mineralogical and gemological characteristics of Piedmontite Quartzite. *West-China Exploration Engineering*, 36 (6): 166-170 (in Chinese)
- Diener JFA, Powell R, White RW and Holland TJB. 2007. A new thermodynamic model for clino- and orthoamphiboles in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{O}$. *Journal of Metamorphic Geology*, 25 (6): 631-656
- Dodson MH. 1973. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 40 (3): 259-274
- Enami M and Banno Y. 2001. Partitioning of Sr between coexisting minerals of the hollandite- and piemontite-groups in a quartz-rich schist from the Sanbagawa metamorphic belt, Japan. *American Mineralogist*, 86 (3): 205-214
- Feng CX. 2011. Geochemical characteristics and sedimentary environment of siliceous rocks of Gerze area in western Bangong Co-Nujiang suture zone, Tibet. *Mineral Deposits*, 30 (5): 773-786 (in Chinese with English abstract)
- Fujinaga K, Nakamura K, Ohta J, Yano M, Kuwahara Y, Yasukawa K, Takaya Y, Nakayama K, Nozaki T and Kato Y. 2022. UMBER as a lithified REY-rich mud in Japanese accretionary complexes and its implications for the osmium isotopic composition of Middle Cretaceous seawater. *Ore Geology Reviews*, 142: 104683
- Ge MH, Zhang JJ, Liu K, Ling YY, Wang M and Wang JM. 2016. Geochemistry and geochronology of the blueschist in the Heilongjiang Complex and its implications in the Late Paleozoic tectonics of eastern NE China. *Lithos*, 261: 232-249
- Ge MH, Zhang JJ, Li L, Liu K, Ling YY, Wang JM and Wang M. 2017. Geochronology and geochemistry of the Heilongjiang Complex and the granitoids from the Lesser Xing'an-Zhangguangcai Range: Implications for the Late Paleozoic-Mesozoic tectonics of eastern NE China. *Tectonophysics*, 717: 565-584
- Ge MH, Zhang JJ, Liu K and Li Z. 2019. Detrital zircon U-Pb dating for the mica schist from the Heilongjiang complex in Mudanjiang area and its geological implications. *Chinese Journal of Geology*, 54 (4): 1265-1289 (in Chinese with English abstract)
- Ge MH, Zhang JJ, Liu K and Li Z. 2020. The Late Paleozoic to Mesozoic tectonics of the Jiamusi block: Evidence from the geochemical characteristics of the blueschists and the $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ age of the mica schist in the Heilongjiang complex, Northeast China. *Chinese Journal of Geology*, 55 (4): 1179-1201 (in Chinese with English abstract)
- Guo J, Zhang JX, Li YS, Wu YW, Li GQ, Zhou K, Guo Q and Mao XH. 2024. Mineralogy, protolith and geological implication of piemontite-bearing metacherts in Qingshuigou, North Qilian. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 43 (2): 238-249 (in Chinese with English abstract)
- Han XM. 2018. Blueschist facies metamorphism in Northeastern China. Ph. D. Dissertation. Changchun: Jilin University, 1-104 (in Chinese with English abstract)
- Han XM, Zheng CQ, Xu XC, Han YB and Xu JL. 2018. Blueschist facies metamorphism and its evolution in the Yilan area, Heilongjiang Province. *Acta Petrologica Sinica*, 34 (4): 1139-1153 (in Chinese with English abstract)
- Hara H, Kurihara T, Kuroda J, Adachi Y, Kurita H, Wakita K, Hisada KI, Charusiri P, Charoentitrat T and Chaodumrong P. 2010. Geological and geochemical aspects of a Devonian siliceous succession in northern Thailand: Implications for the opening of the Paleo-Tethys. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 297 (2): 452-464
- Holland T, Baker J and Powell R. 1998. Mixing properties and activity-composition and relationships of chlorites in the system $\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$. *European Journal of Mineralogy*, 10 (3): 395-406
- Holland T and Powell R. 2003. Activity-composition relations for phases in petrological calculations: An asymmetric multicomponent formulation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 145 (4): 492-501
- Holland TJB and Powell R. 1998. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *Journal of Metamorphic Geology*, 16 (3): 309-343
- Hua YC, Zhang SM, Zhang SF, Xiao ZX and Zhang SQ. 2019. U-Pb zircon age and geochemical characteristics of Early Paleozoic granites in the Baoqing area, Heilongjiang Province. *Geological Bulletin of China*, 38 (7): 1228-1239 (in Chinese with English abstract)
- Huang YC. 2009. Paleozoic metamorphism and tectonic evolution of Jiamusi block. Ph. D. Dissertation. Changchun: Jilin University, 1-132 (in Chinese with English abstract)
- Kato Y, Fujinaga K and Suzuki K. 2011. Marine Os isotopic fluctuations in the Early Eocene greenhouse interval as recorded by metalliferous umbers from a Tertiary ophiolite in Japan. *Gondwana Research*, 20: 594607
- Kong FM. 2010. Petrology study of Heilongjiang metamorphic complex in Yilan district and its lithofacies palaeogeographic significance. Master Degree Thesis. J'nan: Shandong University of Science and Technology, 1-49 (in Chinese with English abstract)
- Leake BE, Woolley AR, Arps CES, Birch WD, Gilbert MC, Grice JD,

- Hawthorne FC, Kato A, Kisch HJ, Krivovichev VG, Linthout K, Laird J, Mandarino JA, Maresch WV, Nickel EH, Rock NMS, Schumacher JC, Smith DC, Stephenson NCN, Ungaretti L, Whittaker EJW and Youzhi G. 1997. Nomenclature of amphiboles; Report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names. *American Mineralogist*, 82(9-10): 1019-1037
- Li JY, Niu BG, Song B, Xu WX, Zhang YH and Zhao ZR. 1999. Formation and Evolution of the Crust in the Northern Segment of the Changbaishan Mountains. Beijing: Geological Publishing House, 1-136 (in Chinese)
- Li R, Sun DY, Suzuki K and Zheng CQ. 2013. Mineral compositions and P-T conditions of the blueschist-mica schist in Heilongjiang complex. *Earth Science (Journal of China University of Geoscience)*, 38(2): 277-288 (in Chinese with English abstract)
- Li WM. 2008. Petrological and geochronological research of blueschist in Heilongjiang Complex and its tectonic significance. Master Degree Thesis. Changchun: Jilin University, 1-68 (in Chinese with English abstract)
- Li WM, Takasu A, Liu YJ, Genser J, Neubauer F and Guo XZ. 2009. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of the high-*P/T* metamorphic rocks of the Heilongjiang Complex in the Jiamusi Massif, northeastern China. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 104(2): 110-116
- Li WM, Takasu A, Liu YJ, Genser J, Zhao YL, Han GQ and Guo XZ. 2011. U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age constrains on protolith and high-*P/T* type metamorphism of the Heilongjiang Complex in the Jiamusi Massif, NE China. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 106(6): 326-331
- Li WM, Liu YJ, Takasu A, Zhao YL, Wen QB, Guo XZ and Zhang L. 2014. Pressure (P)-temperature (T)-time (t) paths of the blueschists from the Yilan area, Heilongjiang Province. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10): 3085-3099 (in Chinese with English abstract)
- Li WM, Liu YJ, Zhao YL, Feng ZQ, Zhou JP, Wen QB, Liang CY and Zhang D. 2020. Tectonic evolution of the Jiamusi Block, NE China. *Acta Petrologica Sinica*, 36(3): 665-684 (in Chinese with English abstract)
- Liu QX. 1994. A study of mineral characteristics and metamorphism within Wudang Group in Northwestern Hubei. *Journal of Wuhan Institute of Chemical Technology*, 16(1): 23-29 (in Chinese with English abstract)
- Liu YJ, Zhang XZ, Jin W, Chi XG, Wang CW, Ma ZH, Han GQ, Wen QB, Zhao YL, Wang WD and Zhao XF. 2010. Late Paleozoic tectonic evolution in Northeast China. *Geology in China*, 37(4): 943-951 (in Chinese with English abstract)
- Niu P. 2021. Chert in the ophiolite mélange within the middle part of the Xingmeng Orogenic Belt and its tectonic significance. Master Degree Thesis. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1-64 (in Chinese with English abstract)
- Pan ZL. 1993. Crystallography and Mineralogy, Volume I. 3rd Edition. Beijing: Geological Publishing House, 1-233 (in Chinese)
- Peng MS, Zheng CS and Xu ZT. 1982. A study on the genesis of piemontite. *Acta Mineralogica Sinica*, (2): 93-98 (in Chinese with English abstract)
- Shao J and Wei CJ. 2011. Petrology and tectonic significance of the Early Mesozoic granulite xenoliths from the eastern Inner Mongolia, China. *Science China (Earth Sciences)*, 54(10): 1484-1491
- Sherrell RM, Field MP and Ravizza G. 1999. Uptake and fractionation of rare earth elements on hydrothermal plume particles at 9°45'N, East Pacific Rise. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63: 1709-1722
- Sun GM, Li XP, Schertl HP and Duan WY. 2025. Metamorphic evolution of blueschists in the Heilongjiang Complex; Implications for the subduction history of the Mudanjang Ocean. *Geoscience Frontiers*, 16(3): 102039
- Suo ST, Sang LK, Han YJ, You ZD, Zhong ZQ, Wang JH, Zhou HW and Zhang ZM. 1993. The Petrology and Tectonics in Dabie Precambrian Metamorphic Terranes, Central China. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1-280 (in Chinese)
- Syracuse EM, van Keken PE and Abers GA. 2010. The global range of subduction zone thermal models. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 183(1-2): 73-90
- Wang DX, Ding DG, Sun SQ, Zhang YY and Liu WX. 2011. Discovery and geological significance of a piemontite-quartzite of the Aoyitag of Aketao County, Kezilesu Kerkezi Autonomous State of Xinjiang, China. *Chinese Journal of Geology*, 46(2): 415-425 (in Chinese with English abstract)
- Wang FL, Wang HP and Lu HF. 2017. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of Late Carboniferous granites from Shangqi area in Great Xing'an Range and its significance. *Northwestern Geology*, 50(4): 51-58 (in Chinese with English abstract)
- Wei W, Wang GQ, Wang LJ, Shi ZP and Zhao QY. 2016. Geochemical Characteristics and tectonic environment of the Upper Paleozoic Heilongjiang rock group in the Yilan Area, Heilongjiang Province. *Heilongjiang Science and Technology Information*, (8): 37-38 (in Chinese)
- White RW, Pomroy NE and Powell R. 2005. An in situ metatextite-diatextite transition in upper amphibolite facies rocks from Broken Hill, Australia. *Journal of Metamorphic Geology*, 23(7): 579-602
- 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(1): 156-172
- Xie HQ, Zhang FQ, Miao LC, Chen FK and Liu DY. 2008. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the amphibolite from "Heilongjiang Group" and the granite in Mudanjang area, NE China, and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1237-1250 (in Chinese with English abstract)
- Xu HH, Zhou YQ, Liu WL, Wang GJ, Yang ZQ, Cheng JL and Zuo XC. 2023. Research progress on siliceous rock and considerations. *Industrial Minerals & Processing*, 52(2): 68-80 (in Chinese with English abstract)
- Xu WL, Wang F, Meng E, Gao FH, Pei FP, Yu JJ and Tang J. 2012. Paleozoic-Early Mesozoic tectonic evolution in the eastern Heilongjiang Province, NE China: Evidence from igneous rock association and U-Pb geochronology of detrital zircons. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(5): 1378-1389 (in Chinese with English abstract)
- Yang H, Ge WC, Bi JH, Wang ZH, Tian DX, Dong Y and Chen HJ. 2018. The Neoproterozoic-Early Paleozoic evolution of the Jiamusi Block, NE China and its East Gondwana connection; Geochemical and zircon U-Pb-Hf isotopic constraints from the Mashan Complex. *Gondwana Research*, 54: 102-121
- Ye HW, Zhang XZ and Zhou YW. 1994. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ Age and its geologic significance of vein crossite in glaucophane-schist, Mudanjang area. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 24(4): 369-372 (in Chinese with English abstract)
- Zhang D, Liu YJ, Li WM, Wen QB and Wu DS. 2018. Early Paleozoic-Late Mesozoic tectonic evolution in Jiamusi Block and adjacent areas. *Global Geology*, 37(4): 1149-1166 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LY. 2023. Origin and depositional environment of cherts and their application in reconstructing ocean plate stratigraphy. *Advances in Earth Science*, 38(5): 453-469 (in Chinese with English abstract)
- Zhao LL. 2011. The evidence of petrology and geochronology on tectonic evolution of Heilongjiang Complex in eastern Heilongjiang Province, China. Ph. D. Dissertation. Changchun: Jilin University, 1-70 (in Chinese with English abstract)
- Zhao LL and Zhang XZ. 2011. Petrological and geochronological evidences of tectonic exhumation of Heilongjiang complex in the eastern part of Heilongjiang Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 1227-1234 (in Chinese with English abstract)
- Zhao LL, Xu FZ, Zhang Y, Ni B and Ma XH. 2021. Zircon U-Pb chronology of the Heilongjiang Complex in Mudanjang Area; Geological implication. *Geology and Resources*, 30(4): 405-413 (in Chinese with English abstract)

Zhou JB, Wilde SA, Zhang XZ, Zhao GC, Zheng CQ, Wang YJ and Zhang XH. 2009. The onset of Pacific margin accretion in NE China: Evidence from the Heilongjiang high-pressure metamorphic belt. *Tectonophysics*, 478(3-4): 230-246

Zhou JB, Zhang XZ, Wilde SA, Zheng CQ, Jin W, Chen H and Han J. 2009. Detrital zircon U-Pb dating of Heilongjiang complex and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1924-1936 (in Chinese with English abstract)

Zhou JB, Wilde SA, Zhao GC, Zhang XZ, Zheng CQ and Wang H. 2010. New SHRIMP U-Pb zircon ages from the Heilongjiang High-Pressure Belt: Constraints on the Mesozoic evolution of NE China. *American Journal of Science*, 310(9): 1024-1053

Zhou JB, Zeng WS, Cao JL, Han J and Guo XD. 2012. The tectonic framework and evolution of the NE China: from ~ 500Ma to ~ 180Ma. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(5): 1298-1316, 1329 (in Chinese with English abstract)

Zhou JB, Han J, Wilde SA, Guo XD, Zeng WS and Cao JL. 2013. A primary study of the Jilin-Heilongjiang high-pressure metamorphic belt: Evidence and tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 386-398 (in Chinese with English abstract)

Zhou JB and Li L. 2017. The Mesozoic accretionary complex in Northeast China: Evidence for the accretion history of Paleo-Pacific subduction. *Journal of Asian Earth Sciences*, 145: 91-100

Zhou JB, Pu XG, Hou HS, Han W, Cao JL and Li GY. 2018. The Mesozoic accretionary complex in NE China and its tectonic implications for the subduction of the Paleo-Pacific plate beneath the Eurasia. *Acta Petrologica Sinica*, 34(10): 2845-2856 (in Chinese with English abstract)

Zhu CY, Zhao GC, Sun M, Liu Q, Han YG, Hou WZ, Zhang XR and Eizenhofer PR. 2015. Geochronology and geochemistry of the Yilan blueschists in the Heilongjiang Complex, northeastern China and tectonic implications. *Lithos*, 216-217: 241-253

Zhu CY, Zhao GC, Sun M, Eizenhofer PR, Liu Q, Zhang XR, Han YG and Hou WZ. 2017. Geochronology and geochemistry of the Yilan greenschists and amphibolites in the Heilongjiang complex, northeastern China and tectonic implications. *Gondwana Research*, 43: 213-228

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

曹喜, 党增欣, 张兴洲, 姜继圣, 王洪德. 1992. 佳木斯复合地体. 长春: 吉林科学技术出版社, 1-224

陈熙皓, 姚瑶, 岳蕴辉, 况守英, 李健, 宋艳萍. 2024. 红帘石石英岩的矿物学和宝石学特征研究. *西部探矿工程*, 36(6): 166-170

冯彩霞. 2011. 班公湖-怒江缝合带西段改则硅质岩地球化学特征及沉积环境. *矿床地质*, 30(5): 773-786

葛茂卉, 张进江, 刘恺, 李壮. 2019. 牡丹江地区黑龙江杂岩中云母片岩的碎屑锆石年代学研究及其地质意义. *地质科学*, 54(4): 1265-1289

葛茂卉, 张进江, 刘恺, 李壮. 2020. 黑龙江杂岩中蓝片岩的地球化学特征和云母片岩的⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄对佳木斯地块晚古生代至中生代构造演化的制约. *地质科学*, 55(4): 1179-1201

郭晶, 张建新, 李云帅, 武亚威, 李国倩, 周开, 郭祺, 毛小红. 2024. 北祁连清水沟红帘石变硅质岩矿物学、原岩特征及地质意义. *岩石矿物学杂志*, 43(2): 238-249

韩晓萌, 郑常青, 徐学纯, 韩玉宝, 徐久磊. 2018. 黑龙江依兰地区蓝片岩相变质作用及其演化. *岩石学报*, 34(4): 1139-1153

韩晓萌. 2018. 东北地区蓝片岩相变质作用研究. 博士学位论文. 长

春: 吉林大学, 1-104

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, 1-734

华永成, 张素梅, 张韶斐, 肖震霞, 张树岐. 2019. 黑龙江宝清地区早古生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄及岩石地球化学特征. *地质通报*, 38(7): 1228-1239

黄映聪. 2009. 佳木斯地块古生代变质作用与构造演化. 博士学位论文. 长春: 吉林大学, 1-132

孔凡梅. 2010. 依兰地区黑龙江变质杂岩的岩石学研究及其岩相古地理意义. 硕士学位论文. 济南: 山东科技大学, 1-49

李锦轶, 牛宝贵, 宋彪, 徐文喜, 张雨红, 赵子然. 1999. 长白山北段地壳的形成与演化. 北京: 地质出版社, 1-136

李蓉, 孙德有, 铃木和博, 郑常青. 2013. 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. *地球科学——中国地质大学学报*, 38(2): 277-288

李伟民. 2008. 黑龙江杂岩带中的蓝片岩岩石学、地质年代学研究及其地质意义. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学, 1-68

李伟民, 刘永江, Takasu A, 赵英利, 温泉波, 郭新传, 张丽. 2014. 黑龙江依兰地区蓝片岩的变质演化 P-T-t 轨迹. *岩石学报*, 30(10): 3085-3099

李伟民, 刘永江, 赵英利, 冯志强, 周建平, 温泉波, 梁琛岳, 张夺. 2020. 佳木斯地块构造演化. *岩石学报*, 36(3): 665-684

刘庆祥. 1994. 鄂西北武当群矿物学特征及变质作用研究. *武汉化工学院学报*, 16(1): 23-29

刘永江, 张兴洲, 金巍, 迟效国, 王成文, 马志红, 韩国卿, 温泉波, 赵英利, 王文弟, 赵喜峰. 2010. 东北地区晚古生代区域构造演化. *中国地质*, 37(4): 943-951

牛鹏. 2021. 兴蒙造山带中段蛇绿混杂岩内硅质岩及其构造意义. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京), 1-64

潘兆橹. 1993. 结晶学及矿物学上册. 3 版. 北京: 地质出版社, 1-233

彭明生, 郑楚生, 许自图. 1982. 海南红帘石的成因研究. *矿物学报*, (2): 93-98

索书田, 桑隆康, 韩郁菁, 游振东, 钟增球, 汪江海, 周汉文, 张泽民. 1993. 大别山前寒武纪变质地体岩石学与构造学. 武汉: 中国地质大学出版社, 1-280

王道轩, 丁道桂, 孙世群, 张炎炎, 刘伟新. 2011. 新疆阿克陶县奥依塔格红帘石石英岩的发现及其意义. *地质科学*, 46(2): 415-425

王粉丽, 王海鹏, 鲁红峰. 2017. 大兴安岭北上其地区晚石炭世花岗岩类 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及地质意义. *西北地质*, 50(4): 51-58

魏巍, 王国琦, 王立佳, 史占培, 赵琪瑜. 2016. 黑龙江省依兰地区上古生界黑龙江岩群岩石地球化学特征及环境探讨. *黑龙江科技信息*, (8): 37-38

颜颜强, 张福勤, 苗天成, 陈福坤, 刘敦一. 2008. 东北牡丹江地区“黑龙江群”中斜长角闪岩与花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质学意义. *岩石学报*, 24(6): 1237-1250

许汉华, 周瑶琪, 刘文连, 王光进, 杨志全, 程家龙, 左习超. 2023. 硅质岩研究进展与思考. *化工矿物与加工*, 52(2): 68-80

许文良, 王枫, 孟恩, 高福红, 裴福萍, 于介江, 唐杰. 2012. 黑龙江

- 省东部古生代-早中生代的构造演化: 火成岩组合与碎屑锆石 U-Pb 年代学证据. 吉林大学学报(地球科学版), 42(5): 1378-1389
- 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⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄及其地质意义. 长春地质学院学报, 24(4): 369-372
- 张夺, 刘永江, 李伟民, 温泉波, 吴迪升. 2018. 佳木斯地块及邻区早古生代-晚中生代构造演化. 世界地质, 37(4): 1149-1166
- 张立杨. 2023. 硅质岩的成因与沉积环境及其在重建洋板块地层中的应用. 地球科学进展, 38(5): 453-469
- 赵亮亮. 2011. 黑龙江杂岩构造演化的岩石学与年代学证据. 博士学位论文. 长春: 吉林大学, 1-70
- 赵亮亮, 张兴洲. 2011. 黑龙江杂岩构造折返的岩石学与年代学证据. 岩石学报, 27(4): 1227-1234
- 赵亮亮, 徐福忠, 张岩, 倪斌, 马晓辉. 2021. 牡丹江地区黑龙江杂岩锆石 U-Pb 年代学特征及地质意义. 地质与资源, 30(4): 405-413
- 周建波, 张兴洲, Wilde SA, 郑常青, 金魏, 陈红, 韩杰. 2009. 黑龙江杂岩的碎屑锆石年代学及其大地构造意义. 岩石学报, 25(8): 1924-1936
- 周建波, 曾维顺, 曹嘉麟, 韩杰, 郭晓丹. 2012. 中国东北地区的构造格局与演化: 从 500Ma 到 180Ma. 吉林大学学报(地球科学版), 42(5): 1298-1316, 1329
- 周建波, 韩杰, Wilde SA, 郭晓丹, 曾维顺, 曹嘉麟. 2013. 吉林-黑龙江高压变质带的初步厘定: 证据和意义. 岩石学报, 29(2): 386-398
- 周建波, 蒲先刚, 侯贺晟, 韩伟, 曹嘉麟, 李功宇. 2018. 东北中生代增生杂岩及对古太平洋向欧亚大陆俯冲历史的制约. 岩石学报, 34(10): 2845-2856