

地质力学学报
Journal of Geomechanics
ISSN 1006-6616,CN 11-3672/P
中文核心期刊
中国科技核心期刊
CSCD 来源期刊（核心库）

《地质力学学报》预出版论文

论文题目：黑龙江杂岩对牡丹江洋晚古生代至中生代构造演化的制约

作者：葛茂卉，张进江，刘恺，郭磊

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026050
投稿时间：2026-04-29
录用时间：2026-09-11
预出版时间：2026-11-18

预出版版权说明

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

引用格式：葛茂卉，张进江，刘恺，等，xxxx. 黑龙江杂岩对牡丹江洋晚古生代—中生代构造演化的制约[J]. 地质力学学报，x（x）：1−19. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026050

Citation: GE M H，ZHANG J J，LIU K，et al.，xxxx. The Late Paleozoic to Mesozoic tectonic evolution of the Mudanjiang Ocean constrained by the Heilongjiang Complex[J]. Journal of Geomechanics，x（x）：1−19. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026050

黑龙江杂岩对牡丹江洋晚古生代—中生代构造演化的制约

葛茂卉[1]，张进江[2]，刘　恺[3]，郭　磊[1]

GE Maohui[1]，ZHANG Jinjiang[2]，LIU Kai[3]，GUO Lei[1]

1. 中国地质科学院地质研究所，北京 100037；
2. 北京大学地球与空间科学学院，北京 100871；
3. 中国地质大学（北京）地球科学与资源学院，北京 100084

1. *Institute of Geology*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100037, *China*;
2. *School of Earth and Space Science*, *Peking University*, *Beijing* 100871, *China*;
3. *School of Earth Sciences and Resources*, *China University of Geoscience*, *Beijing* 100084, *China*

The Late Paleozoic to Mesozoic tectonic evolution of the Mudanjiang Ocean constrained by the Heilongjiang Complex

Abstract: ［**Objective**］The Late Paleozoic to Mesozoic tectonic evolution of the Mudanjiang Ocean remains one of the most contentious issues in constraining the accretionary orogenic framework of Northeast China. A key tectonic remnant recording the subduction and final closure of the Mudanjiang Ocean, the Heilongjiang Complex is critical for reconstructing regional ocean–continent interactions. This study aims to constrain the tectonic affinities of the protoliths of the major rock units in the Heilongjiang Complex in the Yilan area and to explore the genesis, formation age and evolutionary model of the Mudanjiang Ocean. ［**Methods**］Based on detailed field investigations and systematic petrographic observations of blueschists, greenschists, and ultramafic rocks from the Yilan area, we systematically conducted whole-rock major and trace element geochemical analyses and Sr–Nd isotopic measurements. ［**Results**］(1) The Heilongjiang Complex consists of blueschist, greenschist, amphibolite, ultramafic rock, mica schist, siliceous rock and marble, constituting an assemblage characteristic of a dismembered ophiolite. (2) Geochemical data demonstrate that the protoliths of the blueschists and greenschists are alkaline basalts with ocean island basalt (OIB)-like geochemical characteristics, indicating an oceanic island tectonic setting. (3) The ultramafic rocks have undergone intense serpentinization and are identified as mid-ocean ridge type (MOR-type) mantle peridotites formed in a mid-ocean ridge environment. (4) Integrated with previously reported zircon U-Pb protolith ages of 281-288 Ma for Yilan blueschists, it is proposed that, prior to the Early Permian, the Mudanjiang Ocean existed as a branch basin of the Paleo-Pacific Ocean between the Jiamusi and Songnen blocks, rather than as a small oceanic basin derived from intracontinental rifting. ［**Conclusions**］(1) The Heilongjiang Complex in the Yilan area is an accretionary complex containing ophiolitic assemblages. Both blueschist and greenschist were derived from alkaline basalt protoliths with OIB-like geochemical signatures, suggesting an ocean-island origin. The ultramafic rocks are MOR-type mantle peridotites formed in a mid-ocean-ridge setting. (2) The Mudanjiang Ocean was once a branch basin of the Paleo-Pacific Ocean, sandwiched between

基金项目：国家重点研发计划项目（2018YFE0204202）；国家自然科学基金项目（41730210）；中国地质科学院地质研究所基本科研业务费（J2607）

This research was financially supported by the Ministry of Science and Technology (Grant No. 2018YFE0204202) , the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41730210) and the Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences (Grant No. J2607) .

第一作者：葛茂卉（1990—），男，博士，副研究员，从事构造地质学研究工作。Email：gmh19900125@126.com

收稿日期：2026−04−29；**修回日期**：2026−09−02；**录用日期**：2026−09−11；**网络出版日期**：；**责任编辑**：范二平

Received：2026−04−29；Revised：2026−09−02；Accepted：2026−09−11；Available Online：；Handling Editor：FAN Erping

《地质力学学报》预出版

the Jiamusi and Songnen blocks. (3) Temporal and spatial tectonic analyses reveal that its subduction initiated in the south during the Early Permian and propagated northward through the Late Triassic into Early Jurassic. The ocean basin underwent unidirectional westward subduction beneath the Songnen Block and finally closed after the Middle Jurassic. [**Significance**] The revised evolutionary model of the Mudanjiang Ocean improves our understanding of the spatio-temporal span of the Paleo-Pacific Ocean in Northeast China and refines the Late Paleozoic to Mesozoic accretionary orogenic history of the Eastern Central Asian Orogenic Belt.

Keywords: Heilongjiang Complex; geochemistry; Mudanjiang Ocean; Paleo-Pacific; Jiamusi Block

摘　要：黑龙江杂岩是牡丹江洋俯冲闭合后的构造残余，对厘清牡丹江洋晚古生代—中生代构造演化过程具有重要指示意义。该杂岩岩石类型主要包括蓝片岩、斜长角闪岩、绿片岩、超基性岩、云母片岩、硅质岩及大理岩等，整体呈蛇绿岩岩石组合特征，为典型的俯冲增生杂岩。以依兰地区黑龙江杂岩中出露的蓝片岩、绿片岩和超基性岩为研究对象，系统开展了全岩地球化学和Sr-Nd同位素测试分析。地球化学数据显示，依兰地区蓝片岩与绿片岩原岩为碱性玄武岩，具备洋岛玄武岩（OIB）的典型地球化学特征，反映其形成于洋岛环境。区内超基性岩普遍遭受强烈的蛇纹石化改造，地球化学特征指示其原岩可能为洋中脊（MOR）型地幔橄榄岩，形成于洋中脊构造环境。基于依兰地区已获得的蓝片岩原岩形成年龄（288～281 Ma）得出以下结论：在早二叠世之前，牡丹江洋作为古太平洋的分支洋盆夹持于佳木斯与松嫩地块之间，而非陆内裂谷演化形成的小洋盆；洋盆的南部在早二叠世最先开始发生俯冲，并于晚三叠世—早侏罗世逐步向北发展，向西单向俯冲到松嫩地块之下，最终在中侏罗世之后完成闭合。

关键词：黑龙江杂岩；地球化学；牡丹江洋；古太平洋；佳木斯地块

中图分类号：P97+.3; P548　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(xxxx)00−0001−19

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026050

0　引言

黑龙江杂岩为东北亚陆块东缘最靠近内陆的典型增生杂岩，为牡丹江洋俯冲闭合后的构造残余。其形成与演化过程经历了古亚洲洋和古太平洋两大构造域的叠加与改造，记录了佳木斯地块与松嫩地块间牡丹江洋的演化历史，同时也为探究古亚洲洋构造域和古太平洋构造域叠加与转换机制提供宝贵信息(李锦轶等, 1999; Wu et al., 2007; Zhou et al., 2009, 2010; Zhu et al., 2015; Ge et al., 2016; Wang et al., 2024)。

牡丹江洋曾是分隔佳木斯地块与松嫩地块之间的古洋盆，最早由Wu et al.(2011)提出并命名。随后，Zhu et al.(2017b)对黑龙江杂岩的进一步研究中发现，该古大洋对应的地质记录分布范围远超以往认知，据此将其重新命名为黑龙江洋。已有学者对牡丹江洋开展了许多研究，但对其成因、形成时代以及演化模式等一直存在争议。部分学者认为，牡丹江洋形成于二叠纪陆内裂谷环境，其洋盆自晚三叠世—早侏罗世开始俯冲消减(Zhou et al., 2009, 2010; Zhu et al., 2015, 2017a)，直至早白垩世最终闭合(Zhu et al., 2015, 2017b)；另有研究显示，黑龙江蓝片岩原岩形成于距今约288 Ma的洋岛环境；牡丹江洋作为古太平洋的分支洋盆，在早二叠世就已夹持于佳木斯和松嫩地块之间，其初始俯冲发生在早二叠世(约275 Ma)，一直持续到早—中侏罗世才完全闭合(Ge et al., 2016, 2018; Yang et al., 2017; Dong et al., 2019; Yu et al., 2023; Wang et al., 2024; Sun et al., 2025a)。近期，李功宇团队(Li et al., 2022, 2023; 李功宇等, 2026)在佳木斯−兴凯地块的东、西缘厘定出早二叠世、晚二叠世两期南北向岛弧岩浆岩带，证实该地块存在双岛弧结构特征；由此提出早二叠世期因蒙古−鄂霍茨克洋或泛大洋西向俯冲影响，佳木斯地块西缘发生弧后扩张，进而形成牡丹江洋。

此外，针对牡丹江洋的俯冲极性目前仍存在较大争议。部分学者(Wu et al., 2007, 2011; Zhou et al., 2009, 2010; Yu et al., 2012; Zhu et al., 2015; Ge et al., 2016, 2017, 2018, 2019; 葛茂卉等, 2019, 2020; Long et al., 2020; Sun et al., 2025a)依据佳木斯地块西侧俯冲成因变质岩和花岗岩的研究结果，提出牡丹江洋向西俯冲到松嫩地块之下；另有学者(Yang et al., 2017; Dong et al., 2017, 2018, 2019)综合已有相关研究成果，在佳木斯地块和松嫩地块内厘定出2条南北向

《地质力学学报》预出版

平行展布的二叠纪岩浆岩带，并据此建立了牡丹江洋双向俯冲的构造模式。

黑龙江杂岩作为记录牡丹江洋演化历史的关键地质证据，主要由蓝片岩、斜长角闪岩、绿片岩、超基性岩、云母片岩、硅质岩和大理岩等组成，岩石组合上具有一定的蛇绿岩成分特征。已有学者对黑龙江蓝片岩开展了大量的地质年代学和地球化学研究，对其形成时代和构造环境进行了限定，但目前争议依然存在。传统认识将黑龙江杂岩的形成时代归为太古宙 — 中元古代，并认为其在早古生代发生蓝片岩相变质作用（袁庭佐和马家骏，1992；宋彪等，1994）；但近期年代学研究结果显示，黑龙江杂岩原岩可能形成于早二叠世（Zhu et al., 2015; Ge et al., 2016, 2017; Sun et al., 2025a）、晚二叠世—早三叠世（Zhou et al., 2009, 2010; Sun et al., 2025a）、晚三叠世（Zhou et al., 2009）及早侏罗世（Zhu et al., 2017a），变质年龄为早侏罗世（Wu et al., 2007; Zhou et al., 2009; Ge et al., 2016）或中—晚侏罗世（Zhu et al., 2017a）。此外地球化学数据显示，黑龙江蓝片岩原岩具有洋岛玄武岩（OIB）或富集型洋中脊玄武岩（E-MORB）的地球化学特征，反映其原岩可形成于洋岛或裂谷 2 种不同的构造背景（Zhou et al., 2009; Ge et al., 2016, 2017; Zhu et al., 2017a; Sun et al., 2025a）。这些分歧增加了对牡丹江洋演化历史研究的难度。

值得注意的是，以往对黑龙江杂岩的研究之所以存在争议，主要原因在于其研究对象多聚焦于蓝片岩或某种单一岩石，缺乏对整体岩石组合的综合分析。绿片岩和超基性岩作为黑龙江杂岩中的重要组分，尚缺乏系统研究。Zhu et al.（2017a）和 Wang et al.（2024）曾对依兰地区黑龙江杂岩中的绿片岩开展了年代学和地球化学研究，发现其原岩在早二叠世、中二叠世、早侏罗世和晚侏罗世都有分布，其中早二叠世绿片岩原岩为拉斑系列玄武岩，形成于俯冲构造环境；中二叠世、早侏罗世及晚侏罗世绿片岩原岩均属于碱性玄武岩，具备 OIB 的地球化学特征，指示洋岛构造背景。针对超基性岩，现有资料仅报道其主要岩石类型为方辉橄榄岩、二辉橄榄岩或纯橄岩（Wu et al., 2007; Zhou et al., 2009）。绿片岩通常被认为是蓝片岩在折返过程中由于压力降低发生退变质作用所形成，与蓝片岩共同经历了板块的俯冲与折返过程（Zhou et al., 2009）。超基性岩主要为地幔橄榄岩，是蛇绿岩的重要组成单元，随着俯冲板块折返而出露地表。因此，绿片岩和超基性岩对约束黑龙江杂岩的构造背景均具有重要的指示作用。

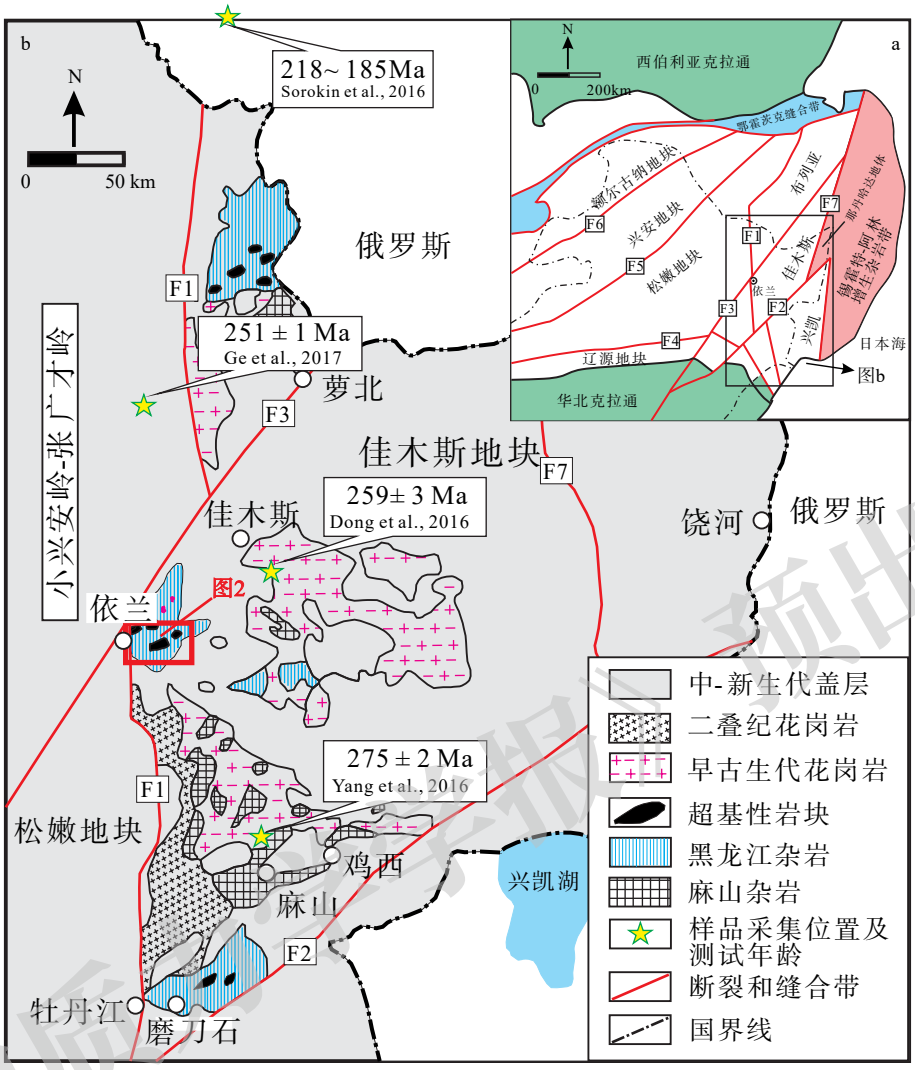
文章以依兰地区黑龙江杂岩中的蓝片岩、绿片岩和超基性岩为研究对象，对其开展系统的矿物学、地球化学和 Sr-Nd 同位素分析。同时结合已有研究成果，从多角度限定黑龙江杂岩形成的构造环境，为解析牡丹江洋晚古生代—中生代的构造演化提供新证据。

1　区域地质背景

中国东北地区位于中亚造山带最东缘，介于华北克拉通与西伯利亚克拉通之间，区域构造由西至东可划分出额尔古纳地块、兴安地块、松嫩地块、佳木斯地块及那丹哈达地体，各构造单元之间分别以新林–喜桂图缝合带、嫩江–黑河缝合带、牡丹江缝合带和跃进山断裂为界（图 1a; Wu et al., 2007, 2011）。

佳木斯地块位于黑龙江东部，东接那丹哈达地体，西邻松嫩地块，北抵布列亚地块，南连兴凯地块（图 1a; Wilde and Zhou, 2015）。布列亚地块、佳木斯地块和兴凯地块具备高度相似的岩石组合特征，被认定为统一构造单元，合称为布列亚–佳木斯–兴凯地块，后期被郯庐断裂北延分支—佳木斯–依兰断裂与敦化–密山断裂所切割（孙晓猛等，2010）。佳木斯地块出露的主体岩石类型包括麻山杂岩、古生代—中生代花岗岩以及黑龙江杂岩（Wu et al., 2007; Zhou et al., 2009; Ge et al., 2016）。其中，麻山杂岩最初命名为“麻山群”，后续 Wilde et al.（1997）发现简单的地层层序理论并不适合麻山群的相关研究，将其更名为“麻山杂岩”。这套杂岩主要由早古生代变质变形侵入岩与时代不清的表壳岩组成，且于晚泛非期遭受角闪岩相至麻粒岩相的变质作用（Wilde et al., 2000）。区内花岗岩形成时代主要分为 2 个阶段：早古生代和晚石炭世—早三叠世（Ge et al., 2021）。早古生代花岗岩集中分布于佳木斯地块中部，在萝北、麻山、双鸭山—密山—鸡东地区广泛出露，岩石以 I 型花岗岩为主，发育少量 A 型花岗岩，形成于后碰撞或造山后伸展背景（Bi et al., 2014）；晚石炭世—早三叠世花岗岩沿佳木斯地块西缘分布，构成一条近南北向的巨型岩浆岩带，整体具有 I 型花岗岩属性，形成于活动大陆边缘环境（Yang et al., 2015, 2017）。

黑龙江杂岩（原称黑龙江群）整体沿牡丹江缝



F1—牡丹江缝合带；F2—敦化-密山断裂；F3—佳木斯-依兰断裂；F4—索伦-西拉木伦河-长春缝合带；F5—嫩江-黑河缝合带；F6—新林-喜桂图缝合带；F7—跃进山断裂

a—东北地区构造地质单元划分（据 Wilde and Zhou, 2015 修改）；b—黑龙江杂岩带区域地质（据 Ge et al., 2016 修改）

图 1 中国东北地区构造地质单元划分与黑龙江杂岩带区域地质简图

Fig. 1 Major tectonic units in Northeast China and simplified geological map of the Heilongjiang Complex belt

(a) Major tectonic units in Northeast China (modified after Wilde and Zhou, 2015); (b) Simplified geological map of the Heilongjiang Complex belt (modified after Ge et al., 2016). F1—Mudanjiang Suture, F2—Dunhua-Mishan Fault, F3—Jiamusi-Yilan Fault, F4—Solonker-Xar Moron-Changchun Suture, F5—Nenjiang-Heihe Suture, F6—Xinlin-Xiguitu Suture, F7—Yuejinshan Fault.

合带呈南北向展布，主要出露于萝北、依兰和牡丹江等地（图 1b; Ge et al., 2016），岩石类型主要为蓝片岩，绿片岩、斜长角闪岩、超基性岩、云母片岩、硅质岩和大理岩等（图 2; Wu et al., 2007; Zhou et al., 2009）。其中，蓝片岩作为黑龙江杂岩的重要组分，原岩为碱性或拉斑系列玄武岩，形成时代介于早二叠世—三叠世，具有 E-MORB 和 OIB 的地球化学特征，一般认为其形成于洋岛或裂谷构造环境（Zhu et al., 2015; Ge et al., 2016, 2017）。蓝片岩变质温度为 320～450℃，压力为 0.9～11.0 GPa（Zhou et al., 2009），属于典型高压变质岩，变质年龄限定为早侏罗世（Zhou et al., 2009; 葛茂卉等, 2020）。绿片岩在黑龙江杂岩中分布广泛，片状构造发育显著，已有年代学数据显示其原岩形成跨度较大，可从早—中二叠世延续至早—晚侏罗世（Zhu et al., 2017a; Wang et al., 2024）。斜长角闪岩多与云母片岩呈构造接触关系，其原岩主体形成于二叠纪，但也有三叠纪和侏罗纪的年龄记录（Ge et al., 2017; Zhu et al., 2017a; Sun

et al., 2025b)，变质作用同样发生在早侏罗世(Ge et al., 2017)。云母片岩以二云母片岩、白云母片岩为主要类型，已有白云母 ^{40}Ar-^{39}Ar 定年结果为 187±2 Ma(葛茂卉等, 2020)。硅质岩中已识别出丰富的几丁虫和放射虫化石，据此判定其属于古洋壳物质组分(张兴洲, 1991; 李锦轶等, 1999)。区内超基性岩普遍遭受蛇纹石化蚀变，根据岩石中的残留矿物组合，推断其原岩类型包括方辉橄榄岩、二辉橄榄岩、纯橄岩以及辉石岩(Wu et al., 2007; Zhou et al., 2009)。

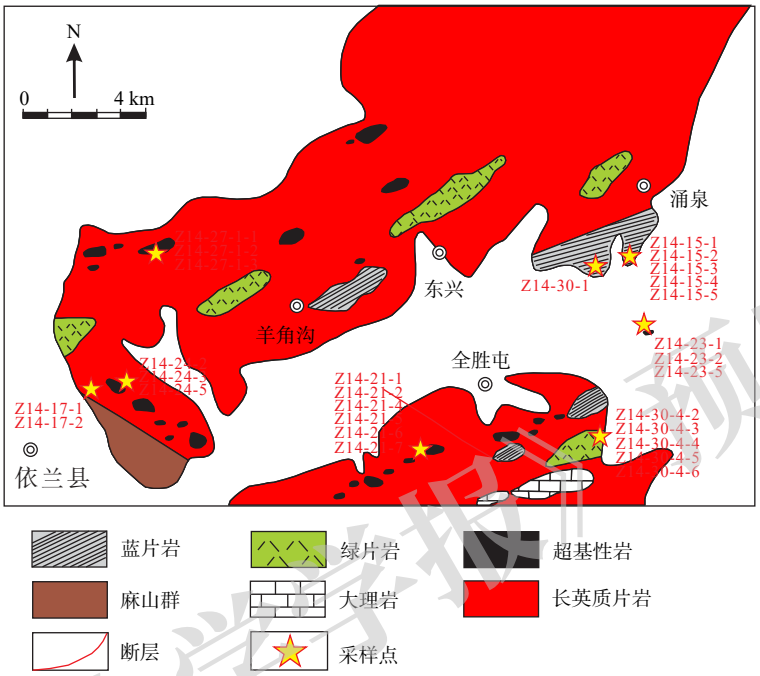


图 2　依兰地区地质图与采样位置（据 Ge et al., 2016 修改）

Fig. 2　Geological map of the Yilan area with sampling locations (modified after Ge et al., 2016).

2　样品描述

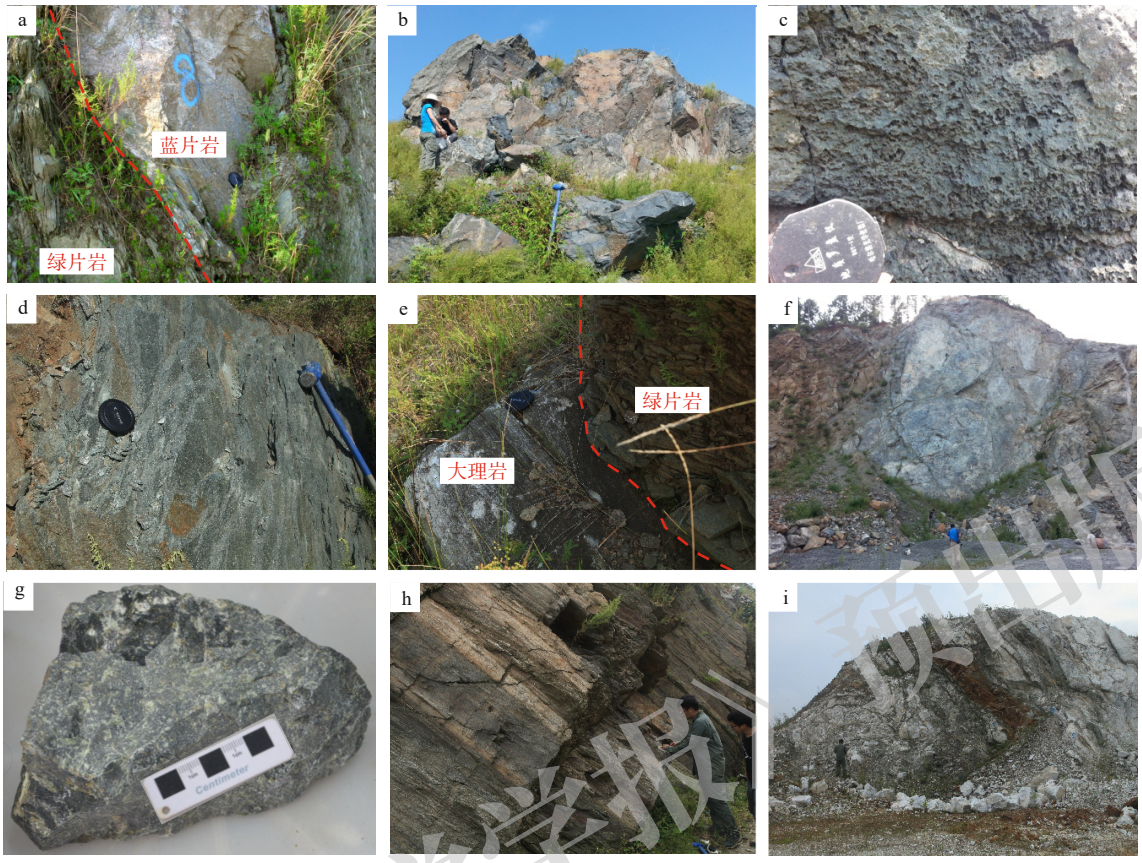
所有样品的采样位置如图 2 所示。6 件蓝片岩样品 Z14-30-1 和 Z14-15-1—Z14-15-5 的地理坐标分别为 46°24′12″N、129°48′05″E 和 45°13′05″N、127°57′54″E。岩石野外露头整体呈蓝灰色，变形程度较弱，多以构造透镜体或块体形式赋存于绿片岩中(图 3a、3b)，并保留气孔和杏仁状构造(图 3c)，指示其原岩为火山岩。镜下观察显示，岩石为针柱状鳞片变晶结构，片理构造发育，主要组成矿物为斜长石、钠质角闪石、绿帘石、绿泥石、白云母和榍石，含有少量的方解石、金红石、锆石、磷灰石、赤铁矿和石英(图 4a、4b)。钠质角闪石呈蓝紫色针柱状，部分晶体边缘蚀变并转化为绿泥石。电子探针分析结果(见附加材料表 1)表明，钠质角闪石主要为铁蓝闪石，元素比值 Mg/(Mg+Fe^{2+})为 0.41～0.47，Al^{VI}/(Fe^{3+}+Al^{VI})为 0.83～0.94(Leake et al., 2003; 图 5a、5b)；斜长石以钠长石为主，Na/(Na+Ca)>0.99，多以变斑晶形式产出，内部包裹细粒针柱状铁蓝闪石和绿帘石等矿物；白云母属于多硅白云母，其硅阳离子数为 3.32～3.37 p.f.u.(每化学式单位)，以鳞片状形式产出。

绿片岩属于低级变质岩，在黑龙江杂岩中出露广泛。样品 Z14-30-4-2—Z14-30-4-6 的采样坐标为 46°19′05″N、129°51′16″E。该岩石整体呈淡绿色(图 3d)，发育典型片状构造，主要以岩片形式产出，并多与蓝片岩伴生，局部可见与大理岩构造接触(图 3e)。镜下观察显示，岩石主要由阳起石、斜长石、绿帘石、绿泥石和石英等矿物组成(图 4c)。

野外露头中，超基性岩多呈暗紫灰色，以构造块体形式零星赋存于片岩中(图 3f)。超基性岩普遍发生强烈蛇纹石化(图 3g)，辉石矿物大多蚀变为角闪石，局部岩石中可观察到残留橄榄石斑晶(图 4d、4e)。电子探针测试结果(见附加材料表 2)显示，橄榄石 Fo 值介于 84.46～87.87，平均为 85.68，属于镁橄榄石。

野外地质调查表明，黑龙江杂岩中还大面积出露云母片岩、硅质岩和大理岩。其中，云母片岩整

《地质力学学报》预出版



a—蓝片岩样品 Z14-15-1 以构造透镜体的形式产于绿片岩中；b—蓝片岩样品 Z14-30-1 呈块体产于黑龙江杂岩内；c—蓝片岩样品 Z14-30-1 发育气孔构造；d—绿片岩样品 Z14-30-4-2 以片状构造产出；e—绿片岩样品 Z14-30-4-2 与大理岩构造接触；f—超基性岩样品 Z14-24-2 以构造块体的形式产于片岩中；g—超基性岩样品 Z14-24-5 局部蛇纹石化；h—云母片岩被浅色长英质或钙质岩脉充填；i—大理岩局部发生强烈变形

图 3 黑龙江杂岩野外露头照片

Fig. 3 Field photographs of analyzed samples from the Heilongjiang Complex

(a) Outcrop of sample Z14-15-1, displaying a blueschist tectonic lens hosted by greenschist; (b) outcrop of sample Z14-30-1, exposed as a large block of blueschist; (c) outcrop of sample Z14-30-1 with a vesicular structure; (d) outcrop of sample Z14-30-4-2 with a schistose structure; (e) outcrop of sample Z14-30-4-2, showing contact with marble; (f) outcrop of sample Z14-24-2, exposed as a large block of ultramafic rock in the Heilongjiang Complex; (g) hand specimen of sample Z14-24-5, showing localized serpentinization; (h) outcrop of mica schist, filled with felsic or calcareous veins; (i) outcrop of marble with local strong deformation.

体呈灰褐色、片状构造发育，局部发育浅色长英质或钙质岩脉（图 3h），主要组成矿物为石英、白云母、斜长石和绿泥石等。硅质岩为块状构造，主要矿物为石英，含少量白云母和斜长石。其原岩应为硅泥质沉积物，后期经历变质−变形作用和动态重结晶作用。大理岩整体为白色致密块状，岩体局部发生强烈变形（图 3i），原岩应为碳酸盐岩（灰岩），经历区域变质作用后形成。

3 实验方法

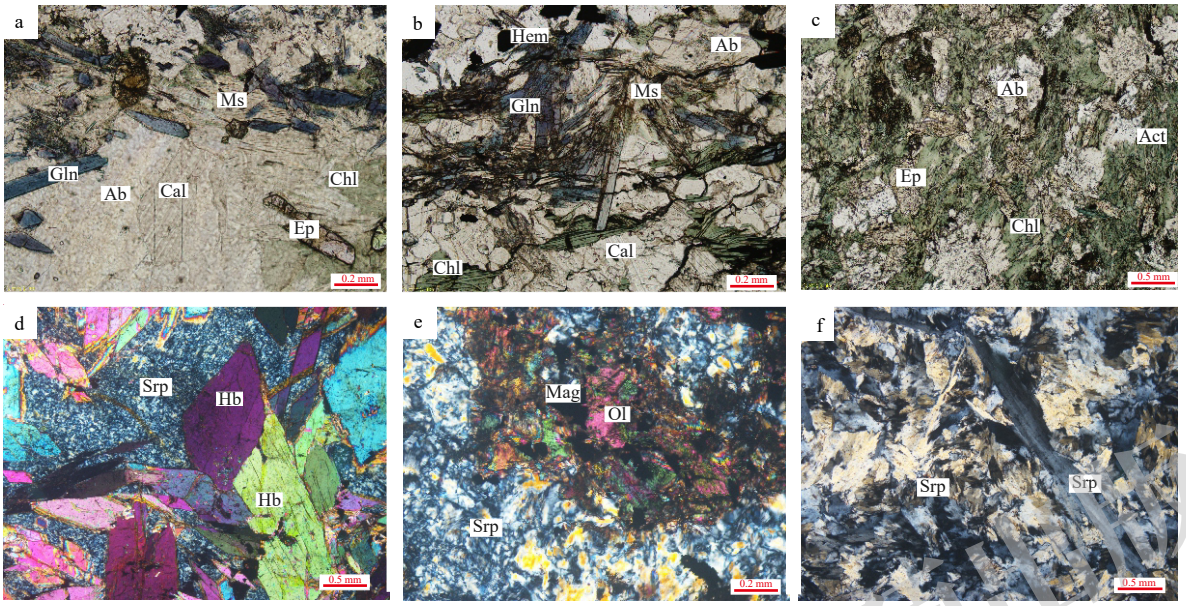
3.1 矿物电子探针分析

矿物的主要元素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司完成，测试设备为日本电子（JEOL）公司制造的 JXA-8230 电子探针。实验条件为：加速电压 15 kV，电子束流 2×10^{-8}A，电子束直径 1 μm。分析的元素主要为 Si、Ti、Ca、Na、Mg、Al、Mn、Fe、K、Cr、Ni，标样为 SPI 标准矿物，数据校正选用 ZAF 校正法。

3.2 全岩主量和微量元素分析

全岩主量元素测试在中国科学院地质与地球物理研究所岩矿制样与分析实验室完成，采用 X 射线荧光熔片法（XRF），测试设备为荷兰 PANalytical 公司 AXIOSMineral 顺序式 X-射线荧光光谱仪。实验选取国际岩石标样 BCR-1 和 BCR-3 监控测试准确度，并利用平行样品评估测试精度。主量元素整

《地质力学学报》预出版



Gln—蓝闪石；Ab—钠长石；Ep—绿帘石；Ms—白云母；Chl—绿泥石；Cal—方解石；Hem—赤铁矿；Act—阳起石；Hb—普通角闪石；Srp—蛇纹石；Ol—橄榄石；Mag—磁铁矿

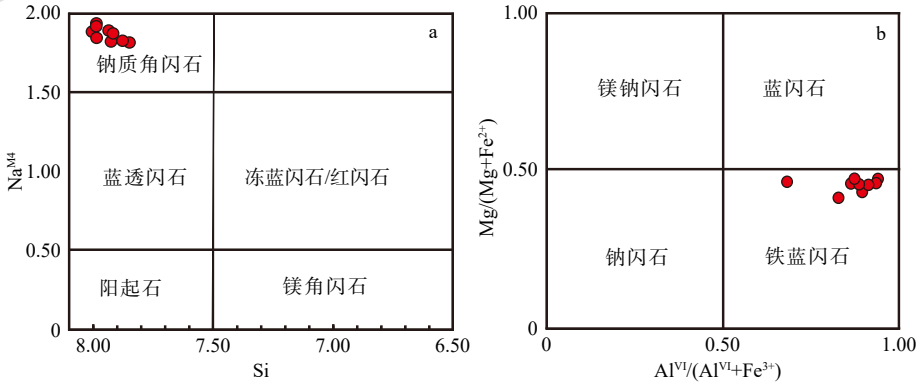
a—蓝片岩样品 Z14-30-1 的特征矿物组合（单偏光镜下）；b—蓝片岩样品 Z14-15-1 的特征矿物组合（单偏光镜下）；c—绿片岩样品 Z14-30-4-2 的特征矿物组合（单偏光镜下）；d—超基性岩样品 Z14-17-1 的特征矿物组合（正交偏光镜下）；e—超基性岩样品 Z14-24-5 的特征矿物组合（正交偏光镜下）；f—超基性岩样品 Z14-21-2 的特征矿物组合（正交偏光镜下）

图 4　黑龙江杂岩显微镜下照片

Fig. 4　Photomicrographs of analyzed samples from the Heilongjiang Complex

(a) Characteristic mineral assemblage of the blueschist sample Z14-30-1 (plane polarized light); (b) characteristic mineral assemblage of the blueschist sample Z14-15-1 (plane polarized light); (c) characteristic mineral assemblage of the greenschist sample Z14-30-4-2 (plane polarized light); (d)characteristic mineral assemblage of ultramafic rock Z14-17-1 (crossed polarized light); (e) characteristic mineral assemblage of ultramafic rock Z14-24-5 (crossed polarized light); (f) characteristic mineral assemblage of ultramafic rock Z14-21-2 (crossed polarized light)

Gln—glaucophane; Ab—albite; Ep—epidote; Ms—muscovite; Chl—chlorite; Cal—calcite; Hem—hematite; Act—actinolite; Hb—hornblende; Srp—serpentine; Ol—olivine; Mag—magnetite



a—Si-Na^{M4}; b—$Al^{VI}/(Al^{VI}+Fe^{3+})$-$Mg/(Mg+Fe^{2+})$

图 5　蓝片岩中角闪石矿物成分图解（据 Leake et al.，2003 修改）

Fig. 5　Diagrams showing amphibole compositions from the blueschist samples (modified after Leake et al., 2003)

(a) Si vs. Na^{M4}; (b) $Al^{VI}/(Fe^{3+} + Al^{VI})$ vs. $Mg/(Mg + Fe^{2+})$

体分析精度优于 1%，实验流程详见 Ge et al.(2016)。

微量元素测试在北京大学造山带和地壳演化教育部重点实验室完成，测试设备为安捷伦公司 Agilent 7500ce ICP-MS 电感耦合等离子体质谱仪。实

验选取国际岩石标样 GSR-1、GSR-3、GSR-10、DZΣ-1 和空白样品来监控测试准确度，并通过设置平行样品检验分析稳定性。多数微量元素分析精度优于 5%，Nb 和 Ta 元素分析精度控制在 10% 以内，实验流程详见 Ge et al.(2016)。

3.3 全岩 Sr-Nd 同位素分析

全岩 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素的分离提纯工作在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成，采用二次阳离子交换柱法对 Rb、Sr、Sm 和 Nd 元素进行分离和提纯，实验流程详见 Chen et al.(2000)。

Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素比值测试在天津地质矿产研究所同位素实验室开展，测试仪器为美国赛默飞世尔公司生产的 TRITON 型热电离同位素质谱仪(TIMS)。实验过程中，$^{87}Sr/^{86}Sr$ 的比值采用 $^{86}Sr/^{88}Sr$=0.1194 进行标准化，调整到标样 NBS-987 $SrCO_3$ $^{87}Sr/^{86}Sr$=0.710250；$^{143}Nd/^{144}Nd$ 的比值采用 $^{146}Nd/^{144}Nd$=0.7219 进行标准化，调整到标样 JMC Nd_2O_3 $^{143}Nd/^{144}Nd$=0.511122。研究采用 Rb 衰变常数 0.0142 Ga^{-1}，Sm 衰变系数 0.00654 Ga^{-1}，全岩初始锶比值 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 由 Rb-Sr 全岩等时线年龄计算得到，钕同位素时间校正值 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 和单阶段钕模式年龄 T_{DM} 的计算公式引自 Chen et al.(2000)。

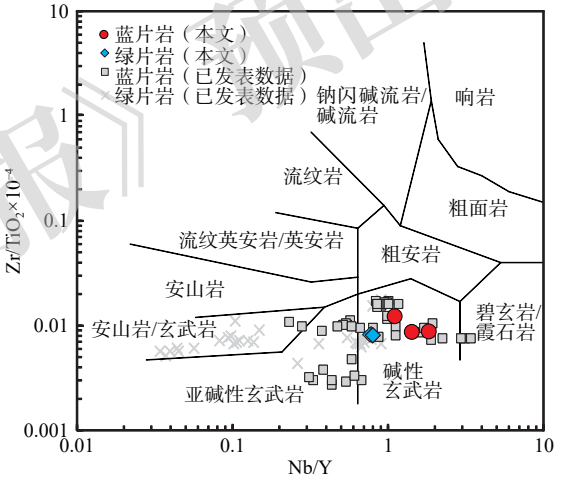
4 实验结果

4.1 岩石地球化学特征

此次研究选取黑龙江杂岩中 6 件蓝片岩，5 件绿片岩和 16 件超基性岩样品开展全岩地球化学测试，分析结果详见附加材料表 3。由于岩石遭受了不同程度的变质作用或者后期的蚀变作用，为了降低对原岩成分分析的影响，对所有主量元素数据扣除烧蚀量(LOI)后进行归一化处理，再开展图解投图与成因判别分析。

4.1.1 蓝片岩

黑龙江杂岩蓝片岩中 SiO_2 含量为 31.86%～38.06%，TiO_2 含量为 2.37%～3.01%，Al_2O_3 含量为 10.34%～13.78%，$Fe_2O_3^T$ 含量为 10.43%～14.17%，MnO 含量为 0.19%～0.25%，MgO 含量为 4.24%～6.40%，CaO 含量为 12.16%～16.32%，P_2O_5 含量为 0.99%～1.43%，Na_2O 含量为 3.52%～3.94%，K_2O 含量为 1.06%～1.58%。依兰地区蓝片岩普遍遭受蓝片岩相变质作用，且样品烧失量高达 9.92%～13.02 %，表明岩石蚀变程度显著，Na_2O 和 K_2O 等活动组分在此变质或者蚀变作用下会发生明显迁移、富集或亏损(Pearce, 1996)，因此传统 TAS 岩石分类图解不适用于此次样品的原岩判别。基于此，选取受变质蚀变影响极小的不活动元素 $Zr/TiO_2\times10^{-4}$-Nb/Y(Winchester and Floyd, 1976)图解进行成因判别。蓝片岩样品均落在碱性系列玄武岩区域，如图 6 所示。虽然蓝片岩的实测 SiO_2 含量很低，不属于基性岩范围，但是考虑到后期蚀变作用的影响以及经烧失量校正后的 SiO_2 含量会显著高于实测值，且依兰地区之前所报道的蓝片岩原岩均为玄武岩(Ge et al., 2016, 2017; 葛茂卉等, 2020)，所以此次判定蓝片岩原岩为碱性玄武岩是充分合理的。



蓝片岩数据来源于 Zhou et al., 2009; Zhu et al., 2015; Ge et al., 2016, 2017; Aouizerat et al., 2020; Zhao et al., 2025; Sun et al., 2025a。绿片岩数据来源于 Zhu et al., 2017a; Wang et al., 2024

图 6 黑龙江杂岩中蓝片岩和绿片岩分类图解(据 Winchester and Floyd, 1976 修改)

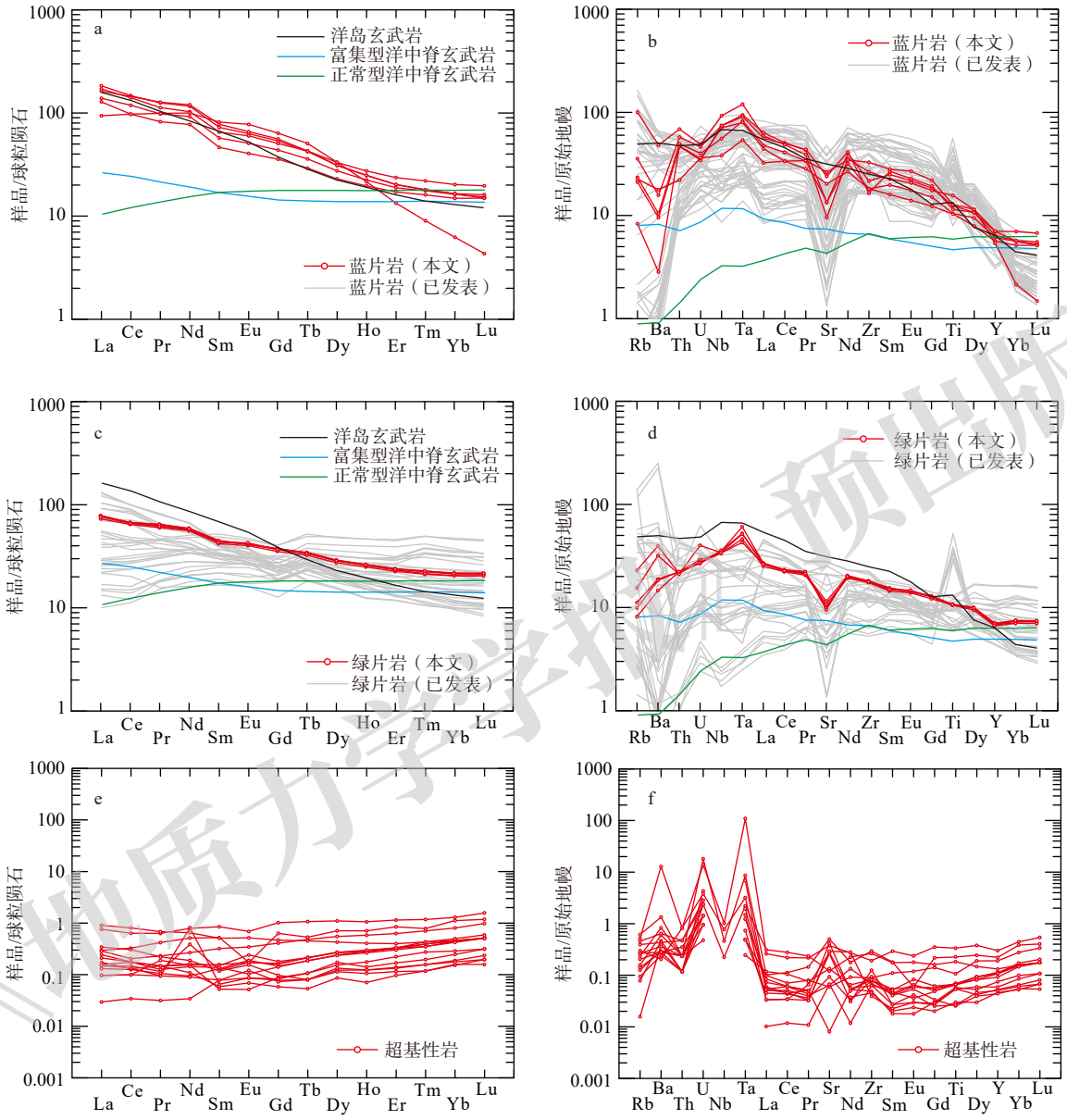
Fig. 6 Geochemical classification of blueschist and greenschist in the Heilongjiang Complex (modified after Winchester and Floyd, 1976)

Data sources for blueschists: Zhou et al. (2009); Zhu et al. (2015); Ge et al. (2016, 2017); Aouizerat et al. (2020); Zhao et al. (2025); Sun et al. (2025a). Data sources for greenschists: Zhu et al. (2017a); Wang et al. (2024).

蓝片岩中稀土元素总量(∑REE)介于 164.90×10^{-6}～243.32×10^{-6}(见附加材料表 3)。球粒陨石标准化配分模式图(图 7a)显示，样品整体表现为轻稀土富集、重稀土亏损的右倾型曲线特征，其 $(La/Yb)_N$ 为 8.46～15.10，$(La/Sm)_N$ 为 1.15～2.77，且无显著铕异常(δEu=1.00～1.07)，整体地球化学特征与典型洋

《地质力学学报》预出版

岛玄武岩(OIB)高度吻合(Niu et al., 2009)。原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 7b)表明，样品显著富集 Nb、Ta 等高场强元素(HFSE)，相对亏损 Rb、Ba 和 Sr 等大离子亲石元素(LILE)。



球粒陨石标准化和原始地幔标准化数值据 Sun and McDonough(1989)；蓝片岩数据来源于 Zhou et al., 2009; Zhu et al., 2015; Ge et al., 2016, 2017; Aouizerat et al., 2020; Zhao et al., 2025; Sun et al., 2025a; 绿片岩数据来源于 Zhu et al., 2017a; Wang et al., 2024

a—蓝片岩稀土元素配分图解；b—蓝片岩微量元素蛛网图；c—绿片岩稀土元素配分图解；d—绿片岩微量元素蛛网图；e—超基性岩稀土元素配分图解；f—超基性岩微量元素蛛网图

图 7　黑龙江杂岩中蓝片岩、绿片岩和超基性岩球粒陨石标准化稀土元素配分图解和原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig. 7　Chondrite-normalized REE diagrams and primitive-mantle-normalized trace element diagrams for blueschist, greenschist, and ultramafic rock in the Heilongjiang Complex

(a) REE diagram for blueschist; (b) trace element diagram for blueschist; (c) REE diagram for greenschist; (d) trace element diagram for greenschist; (e) REE diagram for ultramafic rock; (f) trace element diagram for ultramafic rock.

Chondrite and primitive mantle values are after Sun and McDonough (1989). Data sources for blueschists: Zhou et al. (2009); Zhu et al (2015); Ge et al. (2016, 2017); Aouizerat et al. (2020); Zhao et al. (2025); Sun et al. (2025a). Data sources for greenschists: Zhu et al., (2017a), Wang et al. (2024).

地质力学学报 预出版

4.1.2 绿片岩

黑龙江杂岩绿片岩中 SiO_2 含量为 44.57%～48.17%，TiO_2 含量为 2.46%～2.52%，Al_2O_3 含量为 14.79%～15.69%，$Fe_2O_3^T$ 含量为 12.29%～13.09%，MnO 含量为 0.18%～0.19%，MgO 含量为 6.53%～7.42%，CaO 含量为 8.71%～9.11%，P_2O_5 含量为 0.44%～0.47%，Na_2O 含量为 2.48%～3.17%，K_2O 含量为 0.38%～0.96%。相较于蓝片岩，绿片岩的烧失量更低，仅为 2.58%～3.18%，表明样品经历的后期蚀变作用比较弱。在 $Zr/TiO_2\times10^{-4}$-Nb/Y 岩石分类图解中（图 6），所有样品都落入碱性玄武岩区域。

绿片岩样品的稀土元素总量较低，∑REE 介于 122.47×10^{-6}～129.46×10^{-6}（见附加材料表 3）。球粒陨石标准化稀土配分曲线显示（图 7c），样品的轻重稀土分异程度较弱，其 $(La/Yb)_N$ 为 3.53～3.78，$(La/Sm)_N$ 为 1.74～1.77，且铕异常特征不明显（δEu=1.01～1.07）。原始地幔标准化微量元素蛛网图表明（图 7d），绿片岩样品相对富集 Nb、Ta 等高场强元素，亏损 Rb、Ba 和 Sr 等大离子亲石元素。

4.1.3 超基性岩

超基性岩中 SiO_2 含量为 38.81%～45.67%，TiO_2 含量为 0.01%～0.08%，Al_2O_3 含量为 0.01%～3.47%，$Fe_2O_3^T$ 含量为 9.51%～15.12%，MnO 含量为 0.11%～0.15%，MgO 含量为 25.13%～38.67%，CaO 含量为 0.02%～6.11%。样品的烧失量整体偏高，变化范围为 6.28%～11.92%。这一特征与超基性岩普遍遭受不同程度的蛇纹石化蚀变密切相关。

超基性岩样品的稀土元素总量介于 0.19×10^{-6}～2.25×10^{-6}，显著低于原始地幔（∑REE=7.43×10^{-6}）和亏损地幔（∑REE=4.25×10^{-6}）的稀土总量。球粒陨石标准化稀土配分模式图显示（图 7e），样品稀土配分曲线整体呈近平坦型，表现为轻稀土微弱亏损至轻微富集的特征，其 $(La/Yb)_N$ 为 0.15～2.16，$(La/Sm)_N$ 为 0.35～3.03，且铕具有明显的负/正异常特征（δEu=0.35～1.57）。原始地幔标准化微量元素蛛网图显示（图 7f），受蛇纹石化蚀变流体活动影响，多数样品强烈富集 Ta、U、Sr 元素，而 Rb、Nb 元素则呈现相对亏损特征。

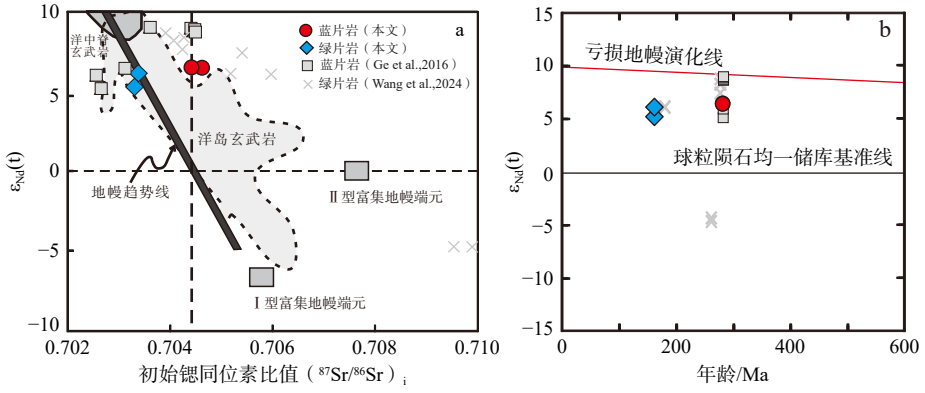
4.2 Sr-Nd 同位素特征

此次研究对 2 件蓝片岩样品和 2 件绿片岩样品开展 Sr-Nd 同位素测试，详细分析结果见附加材料表 4。其中，蓝片岩 Sr-Nd 同位素组成为 $^{87}Sr/^{86}Sr$（0.705210～0.705357）和 $^{143}Nd/^{144}Nd$（0.512833～0.512836），校准至其原岩形成年龄 281 Ma（Ge et al., 2016），其 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 为 0.70443～0.70461，$\varepsilon_{Nd}(t)$ 为 6.45～6.48（图 8a、8b）。绿片岩的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 为 0.703530～0.703732，$^{143}Nd/^{144}Nd$ 为 0.512860～0.512901，校准至其原岩形成年龄 162 Ma（Zhu et al., 2017a），其 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 为 0.70331～0.70337，$\varepsilon_{Nd}(t)$ 为 5.33～6.06（图 8a、8b）。

5 讨论

5.1 黑龙江杂岩的形成环境

此次岩石样品普遍经历了蓝片岩相、绿片岩相变质作用及后期次生蚀变作用，样品烧失量（LOI）介于 2.58%～13.02%。上述变质与蚀变过程可显著改变岩石原始的地球化学组成（Spandler et al., 2004; Xiao et al., 2013）。因此，在探讨黑龙江杂岩原岩类



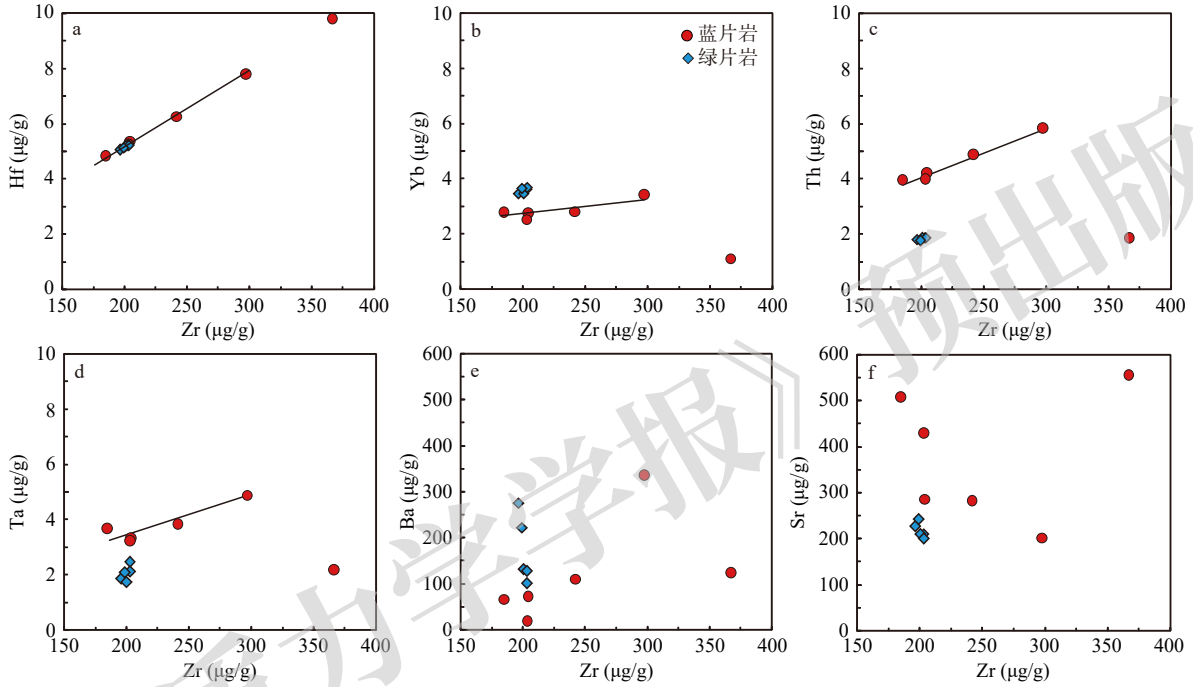
a—$\varepsilon_{Nd}(t)$-初始锶同位素比值（$^{87}Sr/^{86}Sr$）$_i$ 图解；b—$\varepsilon_{Nd}(t)$-年龄图解（数据来源：Ge et al., 2016; Wang et al., 2024）

图 8 黑龙江杂岩中蓝片岩和绿片岩的 Sr-Nd 同位素相关图解

Fig. 8 Sr-Nd isotopic diagrams for blueschist and greenschist in the Heilongjiang Complex

(a) $\varepsilon_{Nd}(t)$ versus I_{Sr}; (b) $\varepsilon_{Nd}(t)$ versus age (data sources: Ge et al., 2016; Wang et al., 2024)

型及其构造环境之前，需系统评估变质、蚀变作用对原岩地球化学成分的影响。已有研究表明，高场强元素（HFSE）如 Nb、Ta、Zr 和 Hf 等在变质作用和蚀变过程中不具备活动性（Spandler et al., 2004; Xiao et al., 2013）。因此，如果某一个元素的分布与 HFSE（通常以 Zr 元素为代表）呈现良好的线性关系，则可判定该元素未受变质作用和蚀变过程的显著改造（Xiao et al., 2013）。基于上述判别依据，对依兰地区蓝片岩和绿片岩的主量/微量元素活动性进行评估（图 9）。结果表明，大离子亲石元素（LILE; 以 Ba 和 Sr 为代表）发生明显活化迁移，而高场强元素（Ta、Zr、Hf 和 Th）和稀土元素（以 Yb 为代表）保持稳定，可有效保留原岩地球化学信息，适用于后续原岩性质及构造环境的讨论。



a—Hf-Zr 图解；b—Yb-Zr 图解；c—Th-Zr 图解；d—Ta-Zr 图解；e—Ba-Zr 图解；f—Sr-Zr 图解

图 9　黑龙江杂岩中蓝片岩和绿片岩 Zr 元素与微量元素相关图解

Fig. 9　Diagrams showing the correlation between Zr and selected trace elements for blueschist and greenschist in the Heilongjiang Complex

(a) Hf versus Zr; (b) Yb versus Zr; (c) Th versus Zr; (d) Ta versus Zr; (e) Ba versus Zr; (f) Sr versus Zr

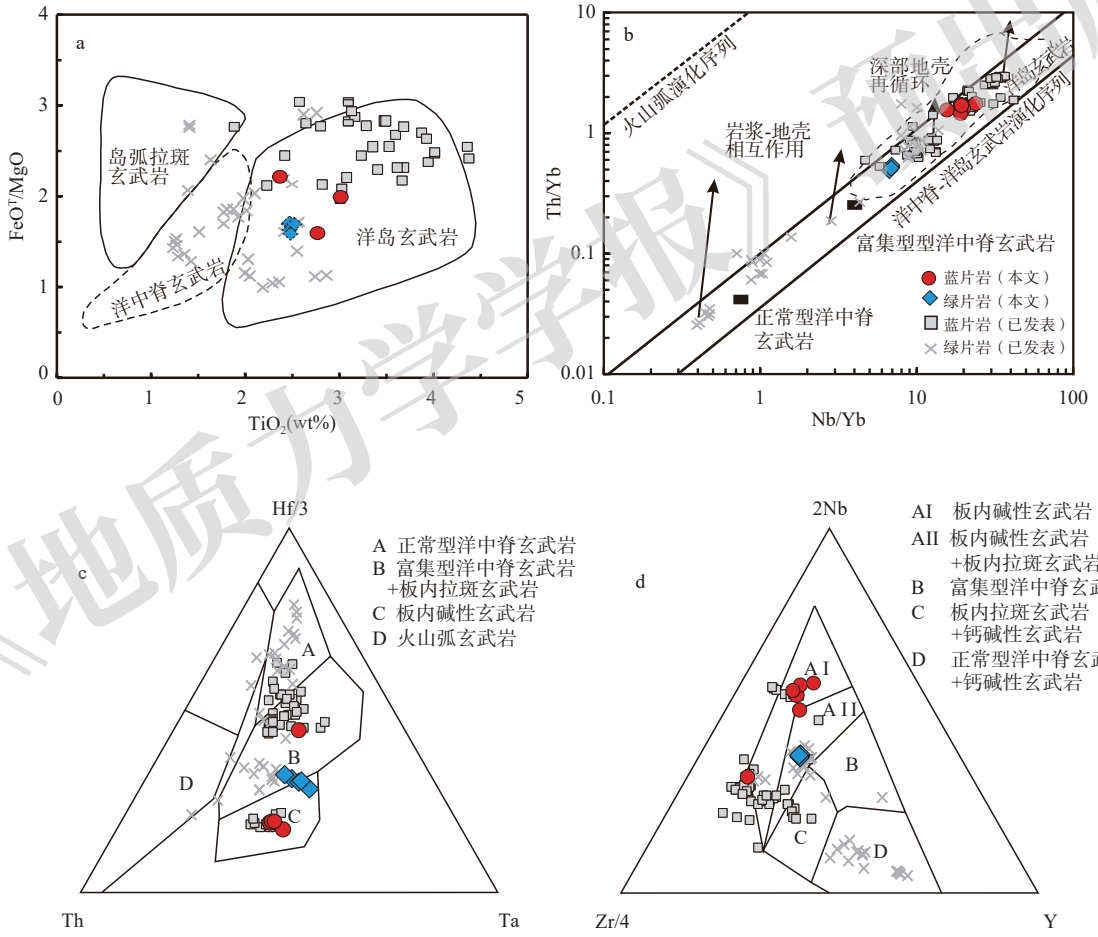
黑龙江蓝片岩原岩为碱性玄武岩（图 6），整体表现为轻稀土富集、重稀土亏损的右倾型曲线特征，具有与典型 OIB 相似的地球化学特征（图 7a、7b）。然而，关于该套蓝片岩原岩的形成构造环境，目前仍存在显著争议。Zhou et al.（2009, 2010）通过对蓝片岩中继承锆石源区的分析，推测其可能来自于佳木斯地块，进而提出黑龙江蓝片岩形成于大陆裂谷环境；Zhu et al.（2015）将蓝片岩原岩划分为碱性和拉斑系列玄武岩，认为二者都来自于石榴石相的橄榄岩部分熔融，其中拉斑系列岩浆的部分熔融程度较高，形成于大陆裂谷环境，而碱性岩浆的熔融程度较低，形成于洋岛环境；近期，Ge et al.（2016, 2017）根据蓝片岩具有比较高的正 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值（+3.7～+9.0）以及 Nb 和 Ta 元素的正异常等特征，认为蓝片岩可能形成于洋岛环境（图 8）。

此次获取的蓝片岩 $\varepsilon_{Nd}(t)$（+6.45 和+6.48）均是正值，且位于 OIB 的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 分布范围之内，Zr 元素无异常或负异常，Nb 和 Ta 元素呈现显著的正异常。而已有研究表明，大陆地壳的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 普遍为为负值（上地壳为−8～−12，下地壳为−6～−10，全地壳为−7～−9；Rudnick and Gao, 2003），同时会富集 Zr 元素，亏损 Nb 和 Ta 元素（Li and Chen, 2014）。本次蓝片岩的同位素和微量元素特征和大陆地壳差别很大，说明蓝片岩原岩几乎没有受到大陆地壳的同化混染作用。因此，此次研究认为蓝片岩原岩为洋岛玄武岩（OIB），形成于洋岛环境，该认识与区域已有研究结果基本一致（Zhou et al., 2009; Zhu et al., 2015; Ge et al., 2016, 2017; 葛茂卉等, 2020）。与此同时，FeO^T/

《地质力学学报》预出版

MgO-TiO_2 和 Th/Yb-Nb/Yb 图解（图 10a、10b）显示，新获取的数据都集中在 OIB 区域；在 Hf/3-Th-Ta 和 2Nb-Zr/4-Y 图解中（图 10c、10d），样品大多投在板内玄武岩区域，进一步证实依兰地区蓝片岩原岩为 OIB。

依兰地区绿片岩原岩以碱性系列玄武岩为主（图 6），整体显示轻稀土富集，重稀土亏损的元素配分特征（图 7c、7d），与典型 OIB 的地球化学特征高度相似，指示其原岩可能形成于洋岛或大陆裂谷环境（Doubleday et al., 1994）。野外地质观测及已有研究成果表明（Zhou et al., 2009; Zhu et al., 2015; Wang et al., 2024），依兰地区绿片岩常作为基质包裹蓝片岩透镜体和岩块，反映 2 类岩石共同经历了板块俯冲与折返演化过程。绿片岩应为蓝片岩折返过程中因压力降低发生退变质作用的产物，暗示二者可能形成于同一构造环境下。此外，绿片岩样品具有较高的正 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值（+5.3～+6.1），与现今典型的 OIB 特征一致（图 8）；同时微量元素蛛网图显示显著的 Nb、Ta 元素正异常（图 7d），基本排除了成岩过程中的陆壳物质混染作用（Rudnick and Gao, 2003; Zhao et al., 2007），进一步证明其原岩为 OIB。在 FeO^T/MgO-TiO_2 和 Th/Yb-Nb/Yb 地球化学判别图解中（图 10a、



蓝片岩数据来源于 Zhou et al., 2009; Zhu et al., 2015; Ge et al., 2016, 2017; Aouizerat et al., 2020; Zhao et al., 2025; Sun et al., 2025a; 绿片岩数据来源于 Zhu et al., 2017a; Wang et al., 2024

a—FeO^T/MgO-TiO_2 图解（据 Glassley, 1974）；b—Th/Yb-Nb/Yb 图解（据 Pearce, 2008）；c—Hf/3-Th-Ta 图解（据 Wood, 1980）；d—2Nb-Zr/4-Y 图解（据 Meschede, 1986）。

图 10 黑龙江杂岩中蓝片岩和绿片岩构造环境判别图解

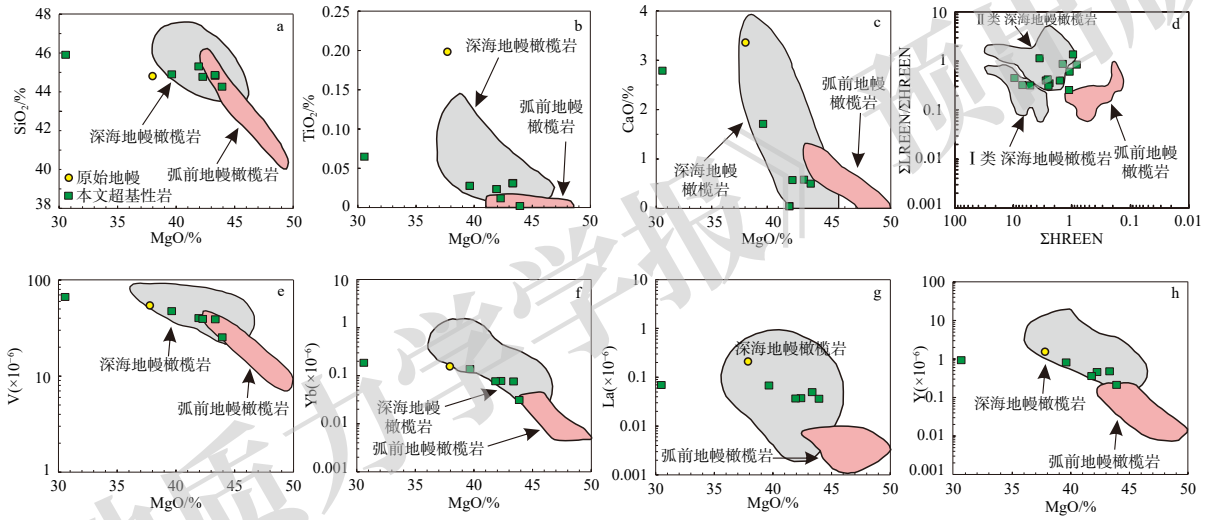
Fig. 10 Discrimination diagrams for identifying tectonic settings

(a) FeO^T/MgO-TiO_2 diagram (Glassley, 1974); (b) Th/Yb-Nb/Yb diagram (Pearce, 2008); (c) Hf/3-Th-Ta diagram (Wood, 1980); (d) 2Nb-Zr/4-Y diagram (Meschede, 1986). Data sources for blueschists: Zhou et al. (2009); Zhu et al. (2015, 2016); Ge et al. (2016, 2017); Aouizerat et al. (2020); Ge et al. (2020); Zhao et al. (2025); Sun et al. (2025a); data sources for greenschists: Zhu et al. (2017a); Wang et al. (2024).

《地质力学学报》编辑出版

10b)，所有绿片岩样品均落入 OIB 区域；在 Hf/3-Th-Ta 和 2Nb-Zr/4-Y 构造判别图解中(图 10c、10d)，所有样品均投于板内玄武岩区域。综合上述地球化学证据，研究认为绿片岩原岩为 OIB，形成于洋岛环境。

依兰地区的超基性岩普遍遭受强烈的蛇纹石化蚀变，仅依靠岩石中的残留矿物难以准确判别其原岩类型。已有研究结表明，黑龙江杂岩内的超基性岩为地幔橄榄岩，主要岩性包括纯橄岩、方辉橄榄岩、二辉橄榄岩(Wu et al., 2007; Zhou et al., 2009)。研究证实，即便超基性岩经历蛇纹石化蚀变，其全岩地球化学特征仍可有效保留原岩的关键信息(Deschamps et al., 2013)。基于此，借助地球化学判别图解，对依兰地区超基性岩的形成构造环境进行初步限定。MgO 与其他主量元素(如 SiO_2、CaO 和 TiO_2)和微量元素(如 V、Yb、La 和 Y)的投图(图 11)结果显示，此次测试的超基性岩样品具有相对较高的 SiO_2、CaO、TiO_2 和 V、Yb、La、Y 含量，较低的 MgO 含量，绝大多数样品都落入深海地幔橄榄岩区域。在 $\Sigma LREE_N/\Sigma HREE_N$-$\Sigma HREE_N$ 图解(图 11d)中，所有样品都落入Ⅰ类和Ⅱ类深海地幔橄榄岩区域。上述特征与球粒陨石标准化配分图(图 7e)所显示的结果相一致，指示这些超基性岩形成于洋中脊环境，为 MOR 型地幔橄榄岩。



原始地幔值据 Sun and McDonough(1989)；深海地幔橄榄岩据 Niu(2004)；弧前地幔橄榄岩据 Parkinson and Pearce(1998)

a—SiO_2-MgO 图解；b—TiO_2-MgO 图解；c—CaO-MgO 图解；d—$\Sigma LREE_N/\Sigma HREE_N$-$\Sigma HREE_N$ 图解；e—V-MgO 图解；f—Yb-MgO 图解；g—La-MgO 图解；h—Y-MgO 图解

图 11　黑龙江杂岩中超基性岩的主量及微量元素与 MgO 图解

Fig. 11　Diagrams showing the variation of oxides and trace elements versus MgO for ultramafic rock in the Heilongjiang Complex

Primitive mantle after McDonough et al. (1995); abyssal peridotites after Niu (2004); fore-arc peridotites after Parkinson and Pearce (1998)

(a) SiO_2 versus MgO; (b) TiO_2 versus MgO; (c) CaO versus MgO; (d) $\Sigma LREE_N/\Sigma HREE_N$ versus $\Sigma HREE_N$; (e) V versus MgO; (f) Yb versus MgO; (g) La versus MgO; (h) Y versus MgO

野外地质调查表明，黑龙江杂岩内还广泛出露斜长角闪岩、云母片岩、硅质岩和大理岩等多类岩石。张兴洲(1991)和李锦轶等(1999)陆续在黑龙江杂岩内发现含放射虫硅质岩和含几丁虫千枚岩，表明其为洋壳组分；此外，Ge et al.(2017)对黑龙江杂岩中的斜长角闪岩进行了地球化学和 Nd 同位素分析，结果显示其原岩为正常型洋中脊玄武岩(N-MORB)，岩浆起源于亏损软流圈地幔。结合蓝片岩、绿片岩以及超基性岩的最新地球化学数据综合分析，黑龙江杂岩原岩具有蛇绿岩的岩石组合特征，主体形成于洋中脊环境，同时洋盆局部存在热点活动，产出洋岛玄武岩(OIB)组分。这套古老洋壳在就位和折返过程中被肢解成一系列残片，形成现今出露的增生杂岩。

5.2　大地构造意义

5.2.1　牡丹江洋是古太平洋的分支还是由裂谷发育而来的小洋盆？

这一科学问题最近引起了国内外学者的广泛

《地质力学学报》预出版

关注。最初，Zhou et al.(2009)通过对依兰和牡丹江地区的黑龙江蓝片岩进行分析，发现二者具有OIB和E-MORB地球化学特征，并且含有来自于佳木斯地块上较老的捕获锆石，认为牡丹江洋的形成可能与佳木斯地块自中亚造山带裂解所产生的裂谷作用相关。随后，Zhu et al.(2015, 2017b)将黑龙江蓝片岩的原岩划分为碱性和拉斑系列玄武岩，其中碱性系列形成于洋岛环境，拉斑系列形成于大陆裂谷环境，并且提出裂谷作用发生在早二叠世，一直持续到三叠纪发展演化为牡丹江洋。虽然Zhou et al.(2009)和Zhu et al.(2015, 2017a)均提出黑龙江蓝片岩的产出背景为裂谷，但是并没有阐明裂谷形成的动力学机制。而Long et al.(2020)在松嫩地块东缘发现一套三叠纪双峰式火成岩组合，将裂谷形成机制归结为古亚洲洋闭合后产生的伸展环境，进而造成牡丹江洋在晚三叠世期间沿嘉荫−牡丹江断裂初始打开。但与此矛盾的是，小兴安岭−张广才岭火成岩和构造混杂岩分布均为南北走向，这与古亚洲洋近东西向的构造体系并不吻合。Ge et al.(2016, 2017)发现依兰地区蓝片岩具有比较高的正$\varepsilon_{Nd}(t)$值(+3.7～+9.0)，Nb和Ta元素具有正异常特征，显示没有被陆壳混染，表明原岩应该形成于洋岛环境，同时获得其原岩锆石U-Pb年龄为288～281 Ma，进而提出牡丹江洋在早二叠世时期为古太平洋的分支存在于佳木斯与松嫩地块之间。Dong et al.(2017, 2018)也赞成这一观点，依据佳木斯地块和松嫩地块结合带发育的二叠纪基性和酸性岩具有弧岩浆的地球化学特征，认为牡丹江洋在约250 Ma之前就已经存在于佳木斯与松嫩地块之间，在晚二叠世发生俯冲。最近，李功宇团队(Li et al., 2022, 2023; 李功宇等, 2026)在佳木斯−兴凯地块东、西两侧识别出早、晚二叠世南北向岛弧岩浆岩带，提出该地块具有双岛弧结构；认为牡丹江洋形成于早二叠世，由蒙古−鄂霍茨克洋或泛大洋西向俯冲触发弧后扩张所形成。

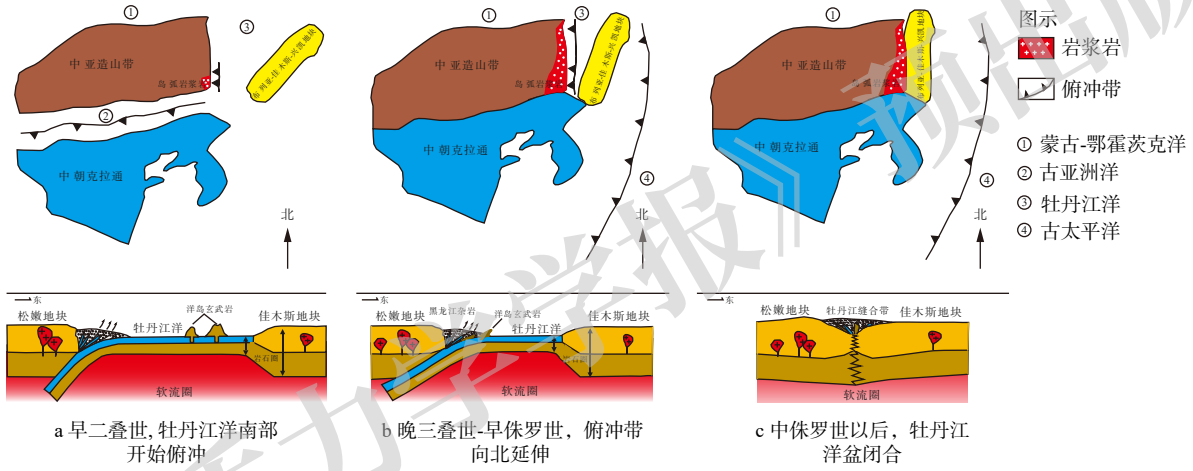
黑龙江杂岩作为牡丹江洋俯冲−增生的唯一直接记录，呈南北向断续展布于佳木斯与松嫩地块之间。野外考察表明，黑龙江杂岩主要由蓝片岩、斜长角闪岩、绿片岩、超基性岩、硅质岩、大理岩和云母片岩组成。基于以往对黑龙江杂岩中蓝片岩和绿片岩的地球化学分析结果，蓝片岩原岩具有OIB属性，可能形成于洋岛环境；绿片岩原岩具有OIB和N-MORB属性，可能形成于洋岛和洋中脊环境；超基性岩为MOR型地幔橄榄岩，形成于洋中脊环境；硅质岩具有放射虫化石(张兴洲, 1991)，千枚岩具有几丁虫化石(李锦轶等, 1999)，表明其形成于大洋环境；斜长角闪岩原岩为N-MORB，形成于洋中脊环境(Ge et al., 2017)。这些具有洋壳特征的岩石类型表明，黑龙江杂岩原岩具有蛇绿岩的岩石组合特征，形成于大洋环境，并不是裂谷环境。此外，蓝片岩锆石U-Pb年龄显示，其原岩形成于288～210 Ma(Zhou et al., 2009; Ge et al., 2016; Sun et al., 2025a)，表明早二叠世—晚三叠世，松嫩地块与佳木斯地块之间被牡丹江洋分隔，并没有发生碰撞，这就否定了“碰撞后伸展”的构造背景。其次，牡丹江洋与古太平洋的构造演化在时空关系上高度吻合。已有研究显示，古太平洋的初始俯冲时间并非为晚三叠世—早侏罗世(Guo et al., 2015; Wilde and Zhou, 2015)，可能前推至早二叠世(Bi et al., 2014; Yang et al., 2015)，这与牡丹江洋可追溯的最早俯冲时间为早二叠世(Yang et al., 2017; Ge et al., 2018)相一致。牡丹江洋西向俯冲所产生的小兴安岭−张广才岭岩浆岩(292～244 Ma; Yang et al., 2017)和黑龙江杂岩均为南北走向，这与古太平洋在东北地区俯冲过程中所产生的岛弧岩浆岩(299～254 Ma; Yang et al., 2017)和那丹哈达增生杂岩走向近乎一致。最后，牡丹江洋是位于松嫩地块和布列亚−佳木斯−兴凯地块之间的洋盆，与古太平洋之间仅被布列亚−佳木斯−兴凯地块相隔，而该地块面积仅有约$30\times10^4 km^2$，不足以分隔开2个构造体系相似的大洋也可进一步作为参考依据。早期研究提出依兰地区蓝片岩形成于裂谷环境，其主要依据为蓝片岩内捕获锆石记录了岩浆上涌过程中大陆地壳物质的混染作用(Zhou et al., 2009; Zhu et al., 2015)。但捕获锆石的来源存在其他潜在解释：锆石既可源自邻近陆块的风尘搬运沉积(Ge et al., 2016)，也可能形成于岩浆上升阶段对上覆洋壳沉积物的混染(Hargrove et al., 2006)。因此，此次研究认为牡丹江洋从晚古生代开始就是古太平洋在西北部的一个分支洋盆，二者为同一构造体系。

5.2.2 牡丹江洋是何时发生俯冲，又是何时闭合的？

关于牡丹江洋的初始俯冲时间，目前学界尚未形成统一认识，存在多种观点：早二叠世(Yang et al., 2017; Ge et al., 2017; Dong et al., 2017; Sun et al., 2025a)、晚二叠世(Dong et al., 2017)、晚三叠世(Zhou et al., 2009; Wu et al., 2011; 邵济安等, 2013; Wilde and Zhou,

2015)以及早侏罗世(Yu et al., 2012; Xu et al., 2013; Guo et al., 2015)。

为何一个洋盆会具有不同的初始俯冲时间呢？通过将以往采样位置进行对比分析发现，牡丹江洋的初始俯冲时间与采样点的位置有关(图 1b)。Yang et al.(2017)提出牡丹江洋的初始俯冲时间在早二叠世，依据是在佳木斯地块西侧发现约 275 Ma 的岛弧型花岗岩，其采样位置大致为 45°30'N。Dong et al.(2017)提出牡丹江洋的初始俯冲作用最早可追溯至晚二叠世，依据是在佳木斯地块西缘获得约 259 Ma 的变辉长岩，形成于活动大陆边缘环境，其采样位置大致为 46°37'N。Ge et al.(2017)按照横穿小兴安岭—张广才岭的路线(铁力—鹤岗地区)采集花岗岩进行分析，获取岩体年龄分布为 251～178 Ma，并且自东向西具有明显变年轻的趋势，提出牡丹江洋的初始俯冲作用最早可追溯至早三叠世，其板块俯冲角度逐渐变缓，其采样位置大致为 47°24′N。往北延伸至俄罗斯远东地区，与俯冲相关的花岗岩形成时代为 218～185 Ma，说明牡丹江洋在早侏罗世才开始发生俯冲(Sorokin et al., 2010, 2016; Wu et al., 2011)。由此可见，牡丹江洋南部最先开始发生俯冲，俯冲带逐步向北发展最终形成类似剪刀式的俯冲模式(如图 12)。这一模式可以很好地将以往研究结果统一起来，更适合解释牡丹江洋的俯冲过程。



a 早二叠世，牡丹江洋南部开始俯冲　b 晚三叠世-早侏罗世，俯冲带向北延伸　c 中侏罗世以后，牡丹江洋盆闭合

a—早二叠世，牡丹江洋南部开始俯冲；b—晚三叠世—早侏罗世，俯冲带向北延伸；c—中侏罗世以后，牡丹江洋盆闭合

图 12　牡丹江洋晚古生代至中生代构造演化模式图

Fig. 12　Cartoon illustrating the three different evolution stages of the Mudanjiang Ocean

(a) Early Permian: subduction initiation in the southern Mudanjiang Ocean; (b) Late Triassic-Early Jurassic: northward propagation of the subduction zone; (c) post-Middle Jurassic: closure of the Mudanjiang Ocean basin

近年来对牡丹江洋闭合时间的限定也取得了很大进展：黑龙江杂岩中沉积岩的最年轻碎屑锆石年龄集中于 176～170 Ma(Wu et al., 2007; 葛茂卉等, 2019; Jing et al., 2022)；变质岩(蓝片岩、斜长角闪岩和云母片岩)的峰期变质年龄为 179～165 Ma(李锦轶等, 1999; 赵英利等, 2010; Li et al., 2011; Ge et al., 2016; Dong et al., 2019)；小兴安岭—张广才岭地区获得的最年轻岛弧岩浆岩锆石 U-Pb 年龄为 172～163 Ma(Wu et al., 2011; Zhu et al., 2017b)，这些证据一致表明牡丹江洋的闭合时代下限应为中侏罗世，即闭合应发生在中侏罗世以后。

5.2.3　牡丹江洋是单向俯冲还是双向俯冲？

关于牡丹江洋的俯冲极性问题，学界目前存在 2 种主流观点。多数学者提出单向俯冲模式，认为牡丹江洋向松嫩地块之下单向俯冲，形成了现今南北向展布的黑龙江杂岩带和小兴安岭−张广才岭岩浆岩带(Wu et al., 2007, 2011; Zhou et al., 2009; Yu et al., 2012; Guo et al., 2015; Zhu et al., 2015, 2017a; Ge et al., 2016, 2017, 2018)；另有部分学者基于新的岩浆岩证据提出双向俯冲模式：在佳木斯地块西缘厘定出一条近南北向分布的二叠纪岩浆岩带(Yang et al., 2017)，与小兴安岭−张广才岭岩浆岩带相对应，指示牡丹江洋曾分别向佳木斯地块和松嫩地块之下双向俯冲(Yang et al., 2017; Dong et al., 2017; Wang et al., 2024)。该双向俯冲观点进一步得到最新研究成果的支持，李功宇团队在佳木斯地块东、西缘先后识别出“双带—双弧”结构特征，为牡丹江洋双向俯冲过程提供了关键证据(Li et al., 2022, 2023; 李功

《地质力学学报》新出版

宇等, 2026)。

通常情况下, 沟−弧-盆体系的空间展布特征是判别俯冲带极性的重要依据(Dickinson, 1973)。但东北地区植被覆盖严重, 且区域经历多期次强烈构造改造作用, 致使牡丹江洋俯冲过程中所对应的沟−弧-盆体系难以完整恢复。此次研究系统梳理牡丹江洋演化相关的岩浆、变质、构造、成矿以及地球物理等已有研究成果, 认为牡丹江洋是单向俯冲到松嫩地块之下, 主要依据如下: ①黑龙江杂岩为牡丹江洋俯冲过程中海沟环境形成的增生杂岩, 整体呈南北向分布在佳木斯地块与松嫩地块之间, 与西侧小兴安岭—张广才岭晚古生代—中生代岛弧岩浆岩近平行分布, 构成典型的俯冲海沟(增生楔)—岛弧构造组合(Wu et al., 2007, 2011; Zhou et al., 2009; Ge et al., 2016, 2017, 2018, 2019; Zhu et al., 2017b)。②深部地球物理资料为俯冲极性判别提供了关键约束。巴彦—桦南地区大地电磁测深和深反射地震剖面结果显示, 佳木斯地块与松嫩地块深部存在清晰的向西俯冲结构, 表现为地壳内及上地幔向西倾伏的楔状反射异常体, 记录了洋壳向西俯冲的深部动力学过程(张兴洲等, 2015; 梁宏达等, 2017)。③小兴安岭—张广才岭地区广泛发育走向 NNE20°～40°的断裂及伴生的牵引褶皱。邵济安等(2013)认为该套构造变形是由于早—中侏罗世期间牡丹江洋向松嫩地块斜向俯冲所产生的挤压剪切作用所致。四是斑岩型铜钼矿床多形成于活动陆缘俯冲构造环境(Sillitoe, 1972; 姚凤良和孙丰月, 2006)。小兴安岭—张广才岭造山带内发育大量早—中侏罗世(197～161 Ma)斑岩型铜钼矿床(Ge et al., 2019; Chen et al., 2019), 成矿时代与造山带主期岩浆活动时限高度耦合, 成矿带整体呈近南北向展布, 指示其成矿作用与牡丹江洋向松嫩地块下的俯冲过程密切相关(Zhang et al., 2013; Chen et al., 2019)。值得注意的是, 佳木斯地块西缘识别出的二叠纪、早三叠世岩浆岩带, 最新研究更倾向形成于弧后伸展背景(许文良等, 2012; Yang et al., 2019; Li et al., 2021), 因此该岩浆岩带能否作为支撑牡丹江洋双向俯冲的有力依据有待进一步商榷与验证。

6 结论

(1)依兰地区黑龙江杂岩为一套具有蛇绿岩岩石组合特征的增生杂岩。其中, 蓝片岩和绿片岩的原岩均为碱性玄武岩, 具有 OIB 的地球化学特征, 指示其形成于洋岛环境; 超基性岩具有 MOR 型地幔橄榄岩特征, 形成于洋中脊环境。

(2)综合已有研究成果, 文章认为牡丹江洋隶属于古太平洋构造体系, 是夹于佳木斯与松嫩地块之间的分支洋盆。该洋盆南部在早二叠世最先开始发生俯冲, 并于晚三叠世至早侏罗世逐步向北扩展, 整体向西单向俯冲到松嫩地块之下, 最终在中侏罗世以后完成闭合。

附加材料: 附表 1、附表 2、附表 3 和附表 4 由作者提供, 数据真实性由作者负责。

作者贡献声明: 葛茂卉、张进江负责论文构思、野外调查、数据分析、研究方法和论文写作和修改; 刘恺、郭磊参与野外调查、数据分析和绘图。所有作者均阅读全文, 赞同稿件的提交与发表

Author's Contributions: Ge Maohui and Zhang Jinjiang conceived the study, carried out field investigations, performed data analysis, designed the research methodology, and drafted and revised the manuscript; Liu Kai and Guo Lei participated in the field investigations, data analysis, and figure generation. All authors have read and approved the submission and publication of the manuscript.

利益冲突声明: 本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

References

AOUIZERAT A, XIAO W J, SCHULMANN K, et al., 2020. Accretion, subduction erosion, and tectonic extrusion during late Paleozoic to Mesozoic orogenesis in NE China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 194: 104258.

BI J H, GE W C, YANG H, et al., 2014. Petrogenesis and tectonic implications of early Paleozoic granitic magmatism in the Jiamusi Massif, NE China: geochronological, geochemical and Hf isotopic evidence[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 96: 308-331.

CHEN B, JAHN B M, WILDE S A, et al., 2000. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: petrogenesis and tectonic implications[J]. Tectonophysics, 328(1-2): 157-182.

CHEN X, LIU J J, CARRANZA E J M, et al., 2019. Geology, geochemistry, and geochronology of the Cuihongshan Fe-polymetallic deposit, Heilongjiang Province, NE China[J]. Geological Journal, 54(3): 1254-1278.

DESCHAMPS F, GODARD M, GUILLOT S, et al., 2013. Geochemistry of

《地质力学学报》预出版

subduction zone serpentinites: a review[J]. Lithos, 178: 96-127.

DICKINSON W R, 1973. Widths of modern arc-trench gaps proportional to past duration of igneous activity in associated magmatic arcs[J]. Journal of Geophysical Research, 78(17): 3376-3389.

DONG Y, GE W C, YANG H, et al., 2017. Permian tectonic evolution of the Mudanjiang Ocean: evidence from zircon U-Pb-Hf isotopes and geochemistry of a N-S trending granitoid belt in the Jiamusi Massif, NE China[J]. Gondwana Research, 49: 147-163.

DONG Y, HE Z H, REN Z H, et al., 2018. Formation of the Permian Taipinggou igneous rocks, north of Luobei (Northeast China): implications for the subduction of the Mudanjiang Ocean beneath the Bureya-Jiamusi Massif[J]. International Geology Review, 60(10): 1195-1212.

DONG Y, GE W C, YANG H, et al., 2019. Geochemical and SIMS U-Pb rutile and LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronological evidence of the tectonic evolution of the Mudanjiang Ocean from amphibolites of the Heilongjiang Complex, NE China[J]. Gondwana Research, 69: 25-44.

DOUBLEDAY P A, LEAT P T, ALABASTER T, et al., 1994. Allochthonous oceanic basalts within the Mesozoic accretionary complex of Alexander Island, Antarctica: remnants of proto-Pacific oceanic crust[J]. Journal of the Geological Society, 151(1): 65-78.

GE M H, ZHANG J J, LIU K, et al., 2016. Geochemistry and geochronology of the blueschist in the Heilongjiang Complex and its implications in the late Paleozoic tectonics of eastern NE China[J]. Lithos, 261: 232-249.

GE M H, ZHANG J J, LI L, et al., 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[J]. Tectonophysics, 717: 565-584.

GE M H, ZHANG J J, LI L, et al. , 2018. A Triassic-Jurassic westward scissor-like subduction history of the Mudanjiang Ocean and amalgamation of the Jiamusi Block in NE China: Constraints from whole-rock geochemistry and zircon U-Pb and Lu-Hf isotopes of the Lesser Xing'an-Zhangguangcai Range granitoids[J]. Lithos, 302-303: 263-277.

GE M H, ZHANG J J, LI L, et al., 2019. Ages and geochemistry of Early Jurassic granitoids in the Lesser Xing'an-Zhangguangcai Ranges, NE China: petrogenesis and tectonic implications[J]. Lithosphere, 11(6): 804-820.

GE M H, ZHANG J J, LIU K, et al., 2019. Detrital zircon U-Pb dating for the mica schist from the Heilongjiang complex in Mudanjiang area and its geological implications[J]. Chinese Journal of Geology, 54(4): 1265-1289. (in Chinese with English abstract)

GE M H, ZHANG J J, LIU K, et al., 2020. The Late Paleozoic to Mesozoic tectonics of the Jiamusi block: Evidence from the geochemical characteristics of the blueschists and the ^{40}Ar-^{39}Ar age of the mica schist in the Heilongjiang complex, Northeast China[J]. Chinese Journal of Geology, 55(4): 1-23. (in Chinese with English abstract)

GE M H, LI L, WANG T, et al. , 2021. Hf isotopic mapping of the Paleozoic-Mesozoic granitoids from the Jiamusi and Songnen blocks, NE China: implications for their tectonic division and juvenile continental crustal growth[J]. Lithos, 386-387: 106048.

GLASSLEY W, 1974. Geochemistry and tectonics of the crescent volcanic rocks, Olympic peninsula, Washington[J]. GSA Bulletin, 85(5): 785-794.

GUO F, LI H X, FAN W M, et al. , 2015. Early Jurassic subduction of the Paleo-Pacific Ocean in NE China: petrologic and geochemical evidence from the Tumen mafic intrusive complex[J]. Lithos, 224-225: 46-60.

HARGROVE U S, STERN R J, KIMURA J I, et al. 2006. How juvenile is the Arabian-Nubian Shield? Evidence from Nd isotopes and pre-Neoproterozoic inherited zircon in the Bi'r Umq suture zone, Saudi Arabia[J]. Earth and Planetary Science Letters, 252(3-4): 308-326.

JING J H, YANG H, GE W C, et al., 2022. Provenance and metamorphic records of forearc sediments from the Heilongjiang Complex, NE China: implications for subduction erosion associated with the Mudanjiang Ocean[J]. GSA Bulletin, 134(11-12): 3049-3063.

LEAKE B E, WOOLLEY A R, BIRCH W D, et al., 2003. Nomenclature of amphiboles: additions and revisions to the International Mineralogical Association's 1997 recommendations[J]. The Canadian Mineralogist, 41(6): 1355-1362.

LI G Y, ZHOU J B, LI L, et al., 2022. Late Paleozoic to Mesozoic tectonic transition in northeastern Eurasia: constraints from two island arc magmatic belts in eastern NE China[J]. GSA Bulletin, 134(9-10): 2576-2588.

LI G Y, ZHOU J B, LI L, 2023. The Jiamusi Block: a hinge of the tectonic transition from the Paleo-Asian Ocean to the Paleo-Pacific Ocean regimes[J]. Earth-Science Reviews, 236: 104279.

LI G Y, ZHOU J B, XIN Z H, et al., 2026. Tectonic evolution of Jiamusi-Khanka block and its constraints on the transition of paleo-oceanic regime[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 56(1): 17-35. (in Chinese with English abstract)

LI J Y, NIU B G, SONG B, et al. , 1999. Crustal formation and evolution of northern Changbai mountains, northeast China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 32-50. (in Chinese)

LI W M, TAKASU A, LIU Y J, et al., 2011. U-Pb and ^{40}Ar/^{39}Ar age constrains on protolith and high-*P/T* type metamorphism of the Heilongjiang Complex in the Jiamusi Massif, NE China[J]. Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, 106(6): 326-331.

LI Z, CHEN B, 2014. Geochronology and geochemistry of the Paleoproterozoic meta-basalts from the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: implications for petrogenesis and tectonic setting[J]. Precambrian Research, 255: 653-667.

LIANG H D, JIN S, WEI W B, et al., 2017. Deep electrical structures of the eastern margin of the Songnen massif and the western margin of the Jiamusi massif[J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(4): 1511-1520. (in Chinese with English abstract)

LONG X Y, XU W L, GUO P, et al., 2020. Opening and closure history of the Mudanjiang Ocean in the eastern Central Asian Orogenic Belt: geochronological and geochemical constraints from early Mesozoic intrusive rocks[J]. Gondwana Research, 84: 111-130.

MESCHEDE M, 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. Chemical Geology, 56(3-4): 207-218.

NIU Y L, 2004. Bulk-rock major and trace element compositions of abyssal peridotites: implications for mantle melting, melt extraction and post-melting processes beneath mid-ocean ridges[J]. Journal of Petrology, 45(12): 2423-2458.

NIU Y L, 2009. Some basic concepts and problems on the petrogenesis of intra-plate ocean island basaltss[J]. Chinese Science Bulletin 54: 4148–4160.

《地质力学学报》预出版

PARKINSON I J, PEARCE J A, 1998. Peridotites from the Izu-Bonin-Mariana Forearc (ODP Leg 125): evidence for mantle melting and melt-mantle interaction in a supra-subduction zone setting[J]. Journal of Petrology, 39(9): 1577-1618.

PEARCE J A, 1996. A user's guide to basalt discrimination diagrams[M]//WYMAN D A. Trace element geochemistry of volcanic rocks: applications for massive sulphide exploration. Geological Association of Canada: 79-113.

PEARCE J A, 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust[J]. Lithos, 100(1-4): 14-48.

RUDNICK R L, GAO S, 2003. Composition of the continental crust[J]. Treatise on Geochemistry, 3: 1-64.

SHAO J A, LI Y F, TANG K D, 2013. Restoration of the orogenic processes of Zhangguangcai Range[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(9): 2959-2970. (in Chinese with English abstract)

SILLITOE R H, 1972. A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits[J]. Economic Geology, 67(2): 184-197.

SONG B, NIU B G, LI J Y, et al., 1994. Isotope geochronology of granitoids in Mudanjiang-Jixi area[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 13(3): 204-213. (in Chinese with English abstract)

SOROKIN A A, KOTOV A B, SAL'NIKOVA E B, et al., 2010. Granitoids of the Tyrma-Bureya complex in the northern Bureya-Jiamusi superterrane of the Central Asian fold belt: age and geodynamic setting[J]. Russian Geology and Geophysics, 51(5): 563-571.

SOROKIN A A, KOTOV A B, KUDRYASHOV N M, et al., 2016. Early Mesozoic granitoid and rhyolite magmatism of the Bureya Terrane of the Central Asian Orogenic Belt: age and geodynamic setting[J]. Lithos, 261: 181-194.

SPANDLER C, HERMANN J, ARCULUS R, et al., 2004. Geochemical heterogeneity and element mobility in deeply subducted oceanic crust; insights from high-pressure mafic rocks from New Caledonia[J]. Chemical Geology, 206(1-2): 21-42.

SUN G M, LI X P, SCHERTL H P, et al., 2025a. Metamorphic evolution of blueschists in the Heilongjiang Complex: implications for the subduction history of the Mudanjiang Ocean[J]. Geoscience Frontiers, 16(3): 102039.

SUN G M, LI X P, SCHERTL H P, et al., 2025b. Reconstructing the tectonic evolution of the Mudanjiang Ocean: metamorphic insights from the Heilongjiang Complex, NE China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 291: 106695.

SUN S S, MCDONOUGH W F, 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[M]//SAUNDERS A D, NORRY M J. Magmatism in the ocean basins. London: Geological Society, London, Special Publications: 313-345.

SUN X M, WANG S Q, WANG Y D, et al., 2010. The structural feature and evolutionary series in the northern segment of Tancheng-Lujiang fault zone[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(1): 165-176. (in Chinese with English abstract)

WANG S M, DONG Y, BI J H, et al. , 2024. Late Paleozoic-Early Mesozoic subduction history of Mudanjiang Ocean: new insights from greenschist in the Heilongjiang Complex, NE China[J]. Lithos, 488-489: 107808.

WILDE S A, DORSETT-BAIN, H L, and LIU J L, 1997. The identification of a Late Pan-African granulite facies event in northeastern China: SHRIMP U–Pb zircon dating of the Mashan group at Liu Mao, Heilongjiang Province, China: Proceedings of the 30th IGC: Glasgow, Precambrian Geology and Metamorphic Petrology, p. 59–74.

WILDE S A, ZHANG X Z, WU F Y, 2000. Extension of a newly identified 500 Ma metamorphic terrane in North East China: further U-Pb SHRIMP dating of the Mashan Complex, Heilongjiang Province, China[J]. Tectonophysics, 328(1-2): 115-130.

WILDE S A, ZHOU J B, 2015. The late Paleozoic to Mesozoic evolution of the eastern margin of the Central Asian Orogenic Belt in China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 113: 909-921.

WINCHESTER J A, FLOYD P A, 1976. Geochemical magma type discrimination: application to altered and metamorphosed basic igneous rocks[J]. Earth and Planetary Science Letters, 28(3): 459-469.

WOOD D A, 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province[J]. Earth and Planetary Science Letters, 50(1): 11-30.

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[J]. Island Arc, 16(1): 156-172.

WU F Y, SUN D Y, GE W C, et al., 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 41(1): 1-30.

XIAO Y Y, NIU Y L, SONG S G, et al. , 2013. Elemental responses to subduction-zone metamorphism: constraints from the North Qilian Mountain, NW China[J]. Lithos, 160-161: 55-67.

XU W L, WANG F, MENG E, et al., 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[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 42(5): 1378-1389. (in Chinese with English abstract)

XU W L, PEI F P, WANG F, et al., 2013. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 74: 167-193.

YANG H, GE W C, ZHAO G C, et al., 2015. Early Permian-Late Triassic granitic magmatism in the Jiamusi-Khanka Massif, eastern segment of the Central Asian Orogenic Belt and its implications[J]. Gondwana Research, 27(4): 1509-1533.

YANG H, GE W C, DONG Y, et al., 2017. Record of Permian-Early Triassic continental arc magmatism in the western margin of the Jiamusi Block, NE China: petrogenesis and implications for Paleo-Pacific subduction[J]. International Journal of Earth Sciences, 106(6): 1919-1942.

YANG H, GE W C, DONG Y, et al. , 2019. Permian subduction of the Paleo-Pacific (Panthalassic) oceanic lithosphere beneath the Jiamusi Block: geochronological and geochemical evidence from the Luobei mafic intrusions in Northeast China[J]. Lithos, 332-333: 207-225.

YAO F L, SUN F Y, 2006. Course on ore deposit geology[M]. Beijing: Geological Publishing House: 90-99. (in Chinese)

《地质力学学报》预出版

YU G Y, YANG H, JING J H, et al. , 2023. Tectonic nature, subduction, and closure of the Mudanjiang Ocean: insights from newly discovered oceanic fragments in the Luobei Heilongjiang Complex[J]. Lithos, 446-447: 107141.

YU J J, WANG F, XU W L, et al., 2012. Early Jurassic mafic magmatism in the Lesser Xing'an-Zhangguangcai Range, NE China, and its tectonic implications: constraints from zircon U-Pb chronology and geochemistry[J]. Lithos, 142: 256-266.

YUAN T Z, MA J J, 1992. Preliminary study on metamorphic rocks and metamorphism in the east of Heilongjiang Province[J]. Heilongjiang Geology, 3(2): 1-19. (in Chinese with English abstract)

ZHANG X Z, 1991. The first discovery of Radiolaria in Heilongjiang Group and its significance[J]. Journal of Changchun University of Earth Sciences(2): 156. (in Chinese)

ZHANG X Z, ZENG Z, GAO R, et al., 2015. The evidence from the deep seismic reflection profile on the subduction and collision of the Jiamusi and Songnen Massifs in the northeastern China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 58(12): 4415-4424. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y, SUN, J G, CHEN, Y. et al. , 2013. Re-Os and U-Pb geochronology of porphyry Mo deposits in central Jilin Province: Mo ore-forming stages in northeast China: International Geology Review, 55: 1763– 1785,

ZHAO G C, WILDE S A, LI S Z, et al., 2007. U-Pb zircon age constraints on the Dongwanzi ultramafic-mafic body, North China, confirm it is not an Archean ophiolite[J]. Earth and Planetary Science Letters, 255(1-2): 85-93.

ZHAO L L, ZHOU J B, WANG T, et al., 2025. Timing of closure of the Jilin-Heilongjiang Ocean: constraints from zircon U-Pb and Ar-Ar dating of the Heilongjiang Complex in NE China[J]. Journal of the Geological Society, 182(1): jgs2024-039.

ZHAO Y L, LIU Y J, LI W M, et al., 2010. High-pressure metamorphism in the Mudanjiang area, southern Jiamusi massif: petrological and geochronological characteristics of the Heilongjiang complex, China[J]. Geological Bulletin of China, 29(2-3): 243-253. (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[J]. Tectonophysics, 478(3-4): 230-246.

ZHOU J B, WILDE S A, ZHAO G C, et al., 2010. New shrimp U-Pb zircon ages from the Heilongjiang high-pressure belt: constraints on the Mesozoic evolution of NE China[J]. American Journal of Science, 310(9): 1024-1053.

ZHU C Y, ZHAO G C, SUN M, et al. , 2015. Geochronology and geochemistry of the Yilan blueschists in the Heilongjiang Complex, northeastern China and tectonic implications[J]. Lithos, 216-217: 241-253.

ZHU C Y, ZHAO G C, SUN M, et al., 2017a. Geochronology and geochemistry of the Yilan greenschists and amphibolites in the Heilongjiang complex, northeastern China and tectonic implications[J]. Gondwana Research, 43: 213-228.

ZHU C Y, ZHAO G C, SUN M, et al., 2017b. Subduction between the Jiamusi and Songliao blocks: geochronological and geochemical constraints from granitoids within the Zhangguangcailing orogen, northeastern China[J]. Lithosphere, 9(4): 515-533.

附中文参考文献

葛茂卉，张进江，刘恺，等，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[J]. 地质科学，54(4)：1265-1289.

葛茂卉，张进江，刘恺，等，2020. 黑龙江杂岩中蓝片岩的地球化学特征和云母片岩的^{40}Ar-^{39}Ar年龄对佳木斯地块晚古生代至中生代构 造演化的制约[J]. 地质科学，55(4)：1-23.

李功宇，周建波，辛中华，等，2026. 佳木斯—兴凯地块的演化历史及其对古大洋构造体制转换的制约[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，56(1)：17-35.

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：32-50.

梁宏达，金胜，魏文博，等，2017. 松嫩地块东缘和佳木斯地块西缘电性结构[J]. 地球物理学报，60(4)：1511-1520.

邵济安，李永飞，唐克东，2013. 张广才岭造山过程的重构及其大地构造意义[J]. 岩石学报，29(9)：2959-2970.

宋彪，牛宝贵，李锦轶，等，1994. 牡丹江-鸡西花岗岩类同位素地质年代学研究[J]. 岩石矿物学杂志，13(3)：204-213.

孙晓猛，王书琴，王英德，等，2010. 郯庐断裂带北段构造特征及构造演化序列[J]. 岩石学报，26(1)：165-176.

许文良，王枫，孟恩，等，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[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，42(5)：1378-1389.

姚凤良，孙丰月，2006. 矿床学教程[M]. 北京：地质出版社：90-99.

袁庭佐，马家骏，1992. 黑龙江省东部变质岩与变质作用初步研究[J]. 黑龙江地质，3(2)：1-19.

张兴洲，1991. 黑龙江群中放射虫的首次发现及意义[J]. 长春地质学院学报(2)：156.

张兴洲，曾振，高锐，等，2015. 佳木斯地块与松嫩地块俯冲碰撞的深反射地震剖面证据[J]. 地球物理学报，58(12)：4415-4424.

赵英利，刘永江，李伟民，等，2010. 佳木斯地块南缘牡丹江地区高压变质作用：黑龙江杂岩的岩石学和地质年代学[J]. 地质通报，29(2-3)：243-253.

《地质力学学报》预出版