



东北地区大地构造演化与成矿制约

杨晓平, 付俊彧, 汪岩, 刘桂香, 张超, 庞雪娇

中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034

摘要: 东北地区处于华北板块、西伯利亚板块与西太平洋板块交汇部位, 是研究华北克拉通、古亚洲洋构造域、古太平洋构造域复合造山与成矿作用的重要地区。东北地区成矿地质条件优越, 是我国战略性矿产资源找矿的重点片区之一。2011 年以来, 为保障我国资源能源可持续发展和重大基础地质问题的解决, 国家逐渐加强了东北地区基础地质调查和研究工作, 在东北地区主要成矿带、盆-山结合带及资源基地开展了大量 1:5 万区域地质矿产调查、成矿地质背景及综合研究等工作, 取得了一大批基础性和原创性地质成果, 填补了东北地区中大比例尺地质调查空白。本文以“东北地区区域地质志”项目为依托, 对 2011 年以来开展的基础地质调查项目取得的新数据和成果进行了系统梳理, 总结了东北地区取得的主要基础地质研究成果或进展。在此基础上, 进一步了解了华北克拉通、兴-蒙造山带等大地构造单元, 恢复了古亚洲洋、鄂霍次克洋、古太平洋构造演化历史, 完善了东北地区大地构造格架, 并探讨了其对区域成矿作用的制约, 为新一轮找矿突破战略实施提供基础地质支持。

关键词: 地质背景; 构造单元; 构造演化; 洋板块; 成矿作用; 东北地区

TECTONIC EVOLUTION AND MINERALIZATION CONSTRAINTS IN NORTHEAST CHINA

YANG Xiao-ping, FU Jun-yu, WANG Yan, LIU Gui-xiang, ZHANG Chao, PANG Xue-jiao

Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China

Abstract: Northeast China, located at the convergence of North China plate, Siberian plate and Western Pacific plate, is an important area for studying the composite orogeny and mineralization of North China Craton, Paleo-Asian Ocean tectonic domain and Paleo-Pacific tectonic domain, and also one of the key regions of strategic mineral resources prospecting due to its superior metallogenic geological conditions. Since 2011, China has continuously strengthened the basic geological survey and research work in Northeast China, carrying out a series of 1:50 000 regional geological and mineral surveys, metallogenic background and comprehensive studies in the main metallogenic belt, basin-mountain junction belt and resources base in the area, to ensure the sustainable development of resources and energy and solve major basic geological problems. Lots of basic and original geological achievements have been made, which have successively filled the blank of large-scale geological surveys in Northeast China. Relying on the *Regional Geology of Northeast China* project, the study systematically sorts out the new data and results obtained from the basic geological

收稿日期: 2024-06-19; 修回日期: 2024-07-23. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局项目“东北地区数据更新及地质编图”(DD20230224); “东北地区基础地质图件更新”(DD20221632-05); “辽东吉南成矿区区域地质调查”(DD20240028).

作者简介: 杨晓平(1969—), 男, 正高级工程师, 从事区域地质调查及研究工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//2922950162@qq.com

通信作者: 刘桂香(1966—), 女, 高级工程师, 从事地质矿产调查及研究工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//549462147@qq.com

survey projects since 2011, and summarizes the main basic geological research and achievements in Northeast China. On this basis, the tectonic units of North China Craton and Xing'an-Mongolian orogenic belt are further decomposed, which have restored the tectonic evolution history of the Paleo-Asian Ocean, Okhotsk Ocean and Paleo-Pacific Ocean, and completed the tectonic framework of Northeast China. With the discussion of the tectonic constraints on regional mineralization, the results will provide basic geological support for the new round of prospecting breakthrough strategic action.

Key words: geological setting; tectonic unit; tectonic evolution; oceanic plate; mineralization; Northeast China

0 引言

中国东北地区位于东北亚大陆边缘,自太古宙以来,经历了华北克拉通演化、古辽-吉洋、古亚洲洋、鄂霍次克洋、古太平洋、现太平洋演化过程。由于多期次构造叠加和改造,形成了复杂的地质演化历史。特殊的地质背景形成了不同的金属矿产资源和能源资源。经过几代地质人的努力,逐步形成了我国重要的金、铜、铁、钼、钴、镍、镁、硼以及油气、煤炭等矿产资源基地,为国家经济建设提供了重要资源和能源保证。

东北地区受浅覆盖和交通不便的影响,基础地质调查和研究程度偏低。2011年以前1:5万区域地质调查面积不足20%,严重制约了找矿工作的进一步开展。2011年以来,国家加强了公益性、基础性地质调查工作,相继完成1:5万区域地质调查和矿产地质调查,同时也开展了基础地质、矿产地质综合研究工作,大大提高了基础地质调查程度,取得了一批重要的调查和研究成果,逐步破解了制约东北地区找矿突破的重大基础地质问题,并发现了一批大、中型矿床,有效支撑了东北老工业基地的振兴。尽管如此,由于对大地构造单元及成矿区带的划分、成矿地质条件等认识不统一,严重制约了区域矿产的找寻和新一轮找矿突破战略行动的开展。本研究以“东北地区区域地质志”项目为依托,在洋板块地质学术思想指导下,对华北克拉通、兴-蒙造山带、华北北缘造山带、东北亚大陆边缘增生造山带等进行进一步分解,探讨古辽-吉洋、古亚洲洋、鄂霍次克洋、古太平洋构造演化过程,重建东北地区大地构造格架。在此基础上,对构造与成矿作用关系进行总结,以期为东北老工业基地的振兴和新一轮找矿突破战略行动的实施提供基础地质支撑。

1 东北地区大地构造格架

东北地区处于华北板块、西伯利亚板块与西太平洋洋板块(东亚陆缘增生带)汇聚部位^[1-3]。经历了太古宙克拉通结晶基底和古元古代褶皱基底的形成、中元古代—古生代克拉通盖层演化和新元古代—晚古生代古亚洲洋、中生代鄂霍次克洋及古太平洋等陆缘增生与块体碰撞等演化过程^[4-10],发育大规模、多期次构造-岩浆活动及与之相应的成矿作用,形成了复杂的地质构造背景。

1.1 大地构造单元划分

根据板块构造理论对东北地区进行了构造单元划分^{①②}。一级构造单元为代表板块构造中古老洋-陆构造格局的大型稳定陆块区、洋盆区和洋-陆转换对接带。古老且稳定的大型陆块区以发育变质基底和稳定盖层为特征,即克拉通,其在洋-陆转换过程中往往经历了古大洋的俯冲消减过程,边缘形成一系列不同规模、不同类型的弧-盆系和不同时期的裂离地块及其间的增生带和混杂岩带,构成增生型造山带,两者在最终古大洋闭合过程形成一个稳定大型陆块区,即板块。洋盆区伴随着大洋的闭合,最终消亡在两个相对古大陆的对接区,由一系列大洋地壳及过渡地壳组成,代表了古大洋的闭合位置,即对接带。各单元的边界在后期多活化成大型断裂带。本研究依据东北地区所处地质构造背景和演化历史,将华北克拉通及其北缘增生造山带构成的华北板块、西伯利亚克拉通及其南缘兴-蒙造山带构成的西伯利亚板块、反映古亚洲洋盆区最终消亡的西拉木伦-长春-延吉板块对接带、反映古太平洋俯冲增生的古太平洋板块(东亚陆缘增生带)划分为4个一级构造单元^{①②}。

①中国地质调查局沈阳地质调查中心. 东北地区数据更新及地质编图项目报告. 2023.

②中国地质调查局沈阳地质调查中心. 东北地区基础地质图件更新课题报告. 2022.

二级构造单元为代表古老且稳定的大型陆块区的克拉通,克拉通边缘造山带(古大陆边缘增生的多岛弧-盆系和陆缘增生带),以及代表古大洋洋壳消亡残留的大洋中脊、洋底高原、洋岛、残余盆地、陆壳残块、高压-超高压变质带等岩石构造组合,即结合带,其边界为俯冲增生岩带和大型断裂带。本研究在东北地区一级构造单元划分基础上进一步划分出华北克拉通、华北板块北缘增生造山带、兴-蒙造山带、西拉木伦-长春-延吉结合带、完达山结合带等6个二级构造单元^{①②}。

三级构造单元是在二级构造单元内的进一步划分。考虑到东北地区前寒武纪基底残块分布、显生宙造山带构造格局和中生代盆-岭构造等特点,将增生造山带进一步划分为地块、大型岛弧带和俯冲增生杂岩带,将陆缘带进一步厘定为陆缘弧和俯冲增生杂岩带,将联合地块进一步划分为地块、俯冲增生杂岩带及上叠的岛弧带和弧后(间)盆地,将对接带进一步划分为岛弧带、残余盆地和增生杂岩带等,其边界为大型断裂带和区域不整合面等^{①②}。

1.2 大地构造单元特征

1.2.1 西拉木伦-长春-延吉对接带

目前,主流认识是西拉木伦-长春-延吉对接带为西伯利亚板块和华北板块最终对接位置^[11-12],记录了西伯利亚与华北板块的最终拼合过程,是东北地区规模最大的一条线性构造带。根据东北地区系列地质编图最新认识(图1)^{①②},西拉木伦-长春-延吉对接带由北部晚石炭世—中二叠世白音昆地-忙牛海增生杂岩带、白城-珲春增生杂岩带和南部柯单山-天山增生杂岩带、长春-开山屯增生杂岩带及其间的早—中二叠世弧-盆系组成,叠加有中—晚二叠世林西-扎鲁特-吉林-敦化残余盆地和晚二叠世—早中三叠世前陆盆地和后造山花岗岩带^{①②}^[13],空间上形成南、北2条俯冲增生杂岩带和对应弧-盆系。以洋中脊为界,南、北2条沟-弧-盆体系建造构成2个二级构造单元,反映古亚洲洋演化晚期具有向南、向北双向俯冲增生特征^[12-14]。

1.2.2 西伯利亚板块

东北地区的主体部分位于西伯利亚克拉通以南

的陆缘增生造山带内,西拉木伦对接带以北以元古宙—古生代形成的中间地块与结合带交织的增生造山带为主,经历了元古宙—晚古生代古亚洲洋构造域的洋-陆转换过程,发育沟-弧-盆体系,并形成总体自北向南变新的增生造山带(兴-蒙造山带东段)。本文划分的西伯利亚板块是指兴-蒙造山带东段部位。由北向南依次划分为额尔古纳地块、头道桥-新林结合带、兴安岛弧、伊尔施-三卡结合带、东乌旗-多宝山岛弧带、贺根山-黑河结合带、松嫩-张广才岭地块、嘉荫-牡丹江结合带、佳木斯地块、同江-跃进山结合带等10个三级构造单元^{①②}。各地块间结合带后期多活化成区域深大断裂,如贺根山-黑河断裂、嘉荫-牡丹江断裂等。结合带的展布方向以北东向为主,时代自北向南依次变新,从新元古代演化到中二叠世,指示古亚洲洋洋盆北向俯冲作用最早发生在额尔古纳一带,逐渐向南后撤,不断形成新的洋壳和俯冲增生作用。相应的活动陆缘从北部额尔古纳地块向南逐渐增生,配套的弧-盆系时代也由北部早古生代逐渐向南变新至晚古生代,早—中三叠世至西拉木伦一带完成华北板块与西伯利亚板块对接^[13-14]。

1.2.3 华北板块

东北地区位于华北板块东北部,包含华北克拉通和华北板块北缘增生造山带2个二级构造单元。南部以华北克拉通为核心,总体形成向北增生的华北板块北缘增生造山带(弧-盆系)。华北克拉通与北缘增生造山带之间被近东西向的赤峰-开源断裂切割。华北克拉通在东北地区由龙岗地块、辽南地块、辽西地块和辽-吉结合带4个三级构造单元组成。龙岗地块、辽南地块之间由辽-吉结合带衔接。华北板块北缘增生造山带由赤峰-通辽弧-盆系、四平-盘石弧-盆系、法库-开源弧-盆系3个三级构造单元组成,其间被北东向敦密、伊舒深大断裂截切,弧-盆系演化时间从早古生代—晚古生代,与西部的白乃庙岛弧、翁牛特岛弧演化时间基本对应^{①②}。

1.2.4 古太平板块(东北亚陆缘增生带)

东北地区中生代进入亚洲东部大陆边缘演化阶段,受蒙古-鄂霍次克洋板块与太平洋板块相互作用的影响,形成巨型活动大陆边缘和陆内造山事件。大

①中国地质调查局沈阳地质调查中心. 东北地区数据更新及地质编图项目报告. 2023.

②中国地质调查局沈阳地质调查中心. 东北地区基础地质图件更新课题报告. 2022.

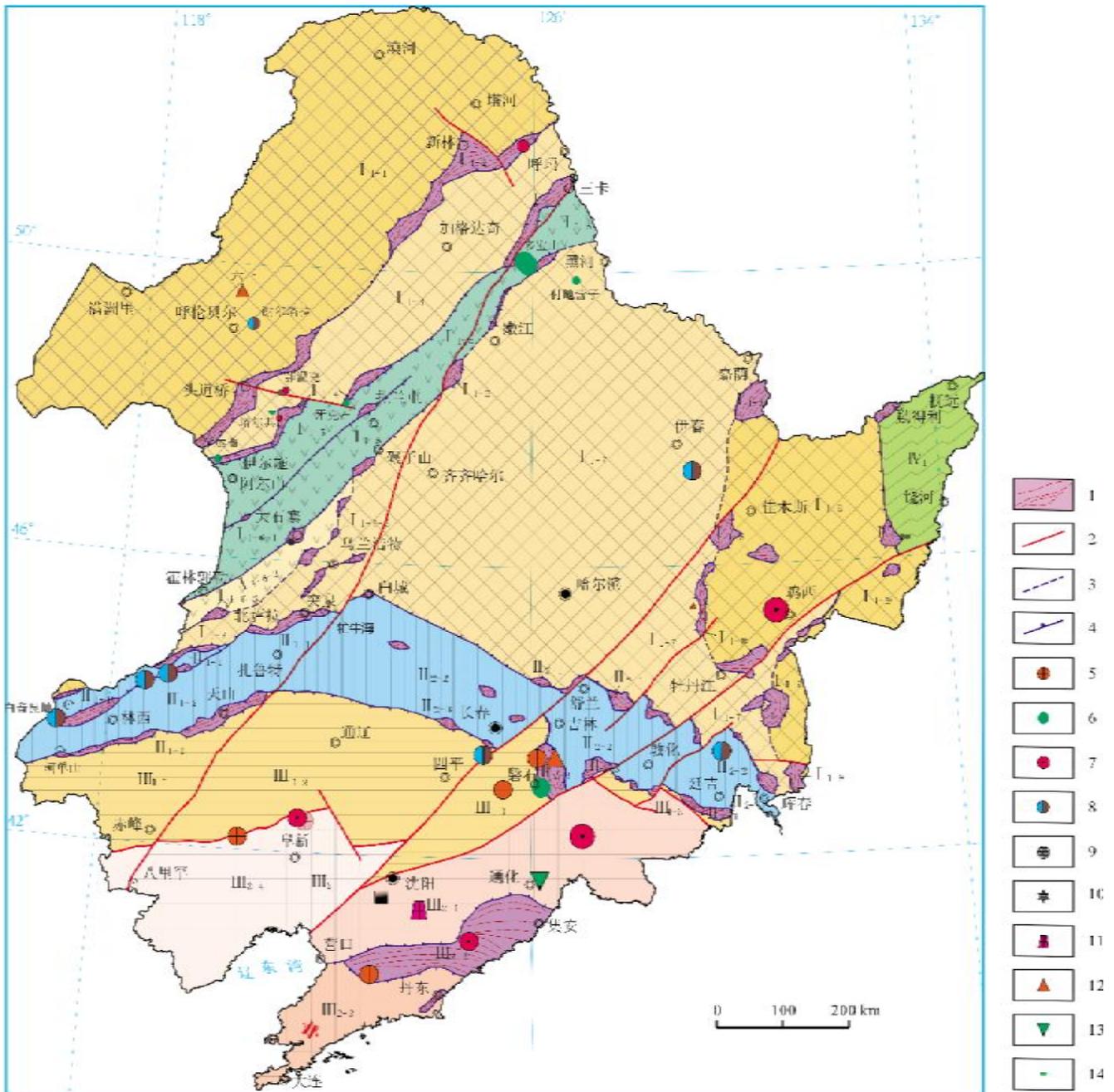


图1 研究区大地构造单元划分及矿产分布图

Fig. 1 Tectonic division and mineral distribution in the study area

I—西伯利亚板块(Siberian plate); I₁—兴蒙造山带(Xing'an-Mongolian orogenic belt); I₁₋₁—额尔古纳地块(Erguna block); I₁₋₂—头道桥-新林结合带(Toudaoqiao-Xinlin junction zone); I₁₋₃—兴安岛弧(Xing'an island arc); I₁₋₄—伊尔施-三卡结合带(Yi'ershi-Sanka combined belt); I₁₋₅—东乌旗-多宝山岛弧带(East Ujimqin-Duobaoshan island arc belt); I₁₋₆—贺根山-黑河结合带(Hegenshan-Heihe junction zone); I₁₋₆₋₁—大石寨-黑河增生杂岩带(Dashizhai-Heihe accretionary complex belt); I₁₋₆₋₂—西乌旗岛弧带(West Ujimqin island arc belt); I₁₋₆₋₃—北萨拉-碾子山增生杂岩带(Beisala-Nianzishan accretionary complex belt); I₁₋₇—松嫩-张广才岭地块(Songnen-Zhanguangcai Range block); I₁₋₈—嘉荫-牡丹江结合带(Jiayin-Mudanjiang junction zone); I₁₋₉—佳木斯地块(Jiamusi block); I₁₋₁₁—同江-跃进山结合带(Tongjiang-Yuejinshan junction zone); II—西拉木伦-延吉对接带(Xar Moron-Yanji opposite zone); II₁—林西-西拉木伦结合带(Linxi-Xar Moron junction zone); II₁₋₁—白音昆地-牮牛海增生杂岩带(Baiyinkundi-Mangniuhai accretionary complex belt); II₁₋₂—林西-扎鲁特残余盆地(Linxi-Zalute residual basin); II₁₋₃—柯单山-天山增生杂岩带(Kedanshan-Tianshan accretionary complex belt); II₂—长春-延吉结合带(Changchun-Yanji junction zone); II₂₋₁—白城-珲春增生杂岩带(Baicheng-Hunchun accretionary complex belt); II₂₋₂—吉

林-敦化残余盆地 (Jilin-Dunhua residual basin); II₂₋₃—长春-开山屯增生杂岩带 (Changchun-Kaishantun accretionary complex belt); III—华北板块 (North China plate); III₁—华北北缘造山带 (orogenic belt of northern margin of North China craton); III₁₋₁—赤峰-通辽弧-盆系 (Chifeng-Tongliao arc-basin system); III₁₋₂—四平弧-盆系 (Siping arc-basin system); III₁₋₃—磐石弧-盆系 (Panshi arc-basin system); III₂—华北克拉通 (North China craton); III₂₋₁—龙岗地块 (Longgang block); III₂₋₂—辽-吉结合带 (Liao-Ji junction zone); III₂₋₃—辽南地块 (southern Liaoning block); III₂₋₄—辽西地块 (western Liaoning block); IV—古太平洋板块 (Paleo-Pacific plate); IV₁—东北亚陆缘增生带 (Northeast Asian marginal accretionary zone); 1—增生杂岩 (accretionary complex); 2—断裂 (fault); 3—增生杂岩连线 (connection between accretionary complexes); 4—增生杂岩极性 (polarity of accretionary complex); 5—金矿 (gold deposit); 6—铜矿 (copper deposit); 7—铁矿 (iron deposit); 8—铅锌矿 (lead-zinc deposit); 9—铬矿 (chrome deposit); 10—金刚石矿 (diamond deposit); 11—铝土矿 (bauxite deposit); 12—硫矿 (sulphur deposit); 13—磷矿 (phosphorite deposit); 14—铍矿 (beryllium deposit)

地构造格架以北北东走向的盆-岭构造为主体, 发育大量的中生代岩浆岩、沉积盆地和大型走滑断裂系统, 伴生巨量矿产资源, 整体上构成了中生代东北亚活动大陆边缘, 即中生代一级构造单元^{①②}。目前, 东北地区没有发现与蒙古-鄂霍次克洋俯冲相关的直接证据, 但大兴安岭及辽西地区出露的大量北东、北东东向展布的早中生代岩浆岩、火山-沉积盆地, 记录了蒙古-鄂霍次克洋南向俯冲作用^[6, 15-18], 其形成的活动陆缘相当于中生代东北亚活动大陆边缘的二级构造单元。古太平洋板块的俯冲作用对欧亚大陆东部边缘的演化起了重要作用^[19]。东亚大陆东缘中-新生代的构造演化及其相关重大地质事件的发生主要受古太平洋-太平洋板块俯冲作用过程的控制^[10, 19-21], 晚中生代东北地区几乎全部卷入东部大陆边缘演化^[6, 22-25]。黑龙江省东部的完达山地区饶河增生杂岩是叠加在欧亚板块之上的陆缘增生带, 是古太平洋板块西向俯冲的直接证据^[20], 也是古太平洋板块的一部分, 相当于一级大地构造单元。

2 东北地区前寒武纪构造演化与成矿作用

东北地区位于华北克拉通东部, 发育大面积的太古宙变质基底及古元古代褶皱基底, 之上叠加有新元古代一早古生代被动陆缘沉积盖层。华北克拉通内保存有中国时代最老的结晶基底, 发育巨量的沉积-变质型铁矿(图2)。多年来, 众多学者针对东北地区前寒武纪结晶基底的地质结构、古板块运动、克拉通基底破坏与成矿作用等焦点问题开展了不间断研究, 取得一系列新认识和新进展。

2.1 华北克拉通太古宙结晶基底

同位素测年技术的高速发展, 为研究华北克拉通基底的形成时代、构造演化、成矿期次等提供了精确的

年代学数据。通过克拉通基底物质组成的时空关系及成因研究, 进一步完善了华北克拉通东部的地质结构, 相继分解出结晶基底、褶皱基底、盖层与基性岩浆岩群等, 揭示了沉积变质型铁矿的形成时代和成矿背景。

在华北克拉通基底变质岩中陆续发现了大量4.0~3.9 Ga 碎屑锆石, 揭示华北克拉通内发育始太古代古老陆壳^[4, 26-27]。鞍山、本溪地区有多处3.8 Ga 岩浆构造杂岩侵入, 如白家坟杂岩、东山杂岩、深沟寺杂岩、锅底山杂岩(岩石类型包括奥长花岗岩和石英闪长岩)^[4, 27-28], 印证了始太古代古老陆壳的存在, 同时也表明华北克拉通在3.8 Ga 左右发育较强岩浆活动。鞍-本地区相继发育古太古代(3.6~3.2 Ga)、中太古代(3.2~2.8 Ga)TTG 岩浆岩^[29], 表明古老岩浆作用具有一定连续性。陈台沟表壳岩(3.36 Ga)和铁架山表壳岩(3.0~2.9 Ga)是现今保存最老的表壳岩^[27], 主要为一套变质火山-沉积岩, 包括绿片岩相至麻粒岩相变沉积岩和双峰式火山岩, 原岩为基性火山岩、酸性火山岩、石英砂岩等, 岩石组合具有古老陆壳上的裂谷火山盆地沉积特征。

据研究^[29], 华北克拉通中太古代以前的地壳增生作用可能与地幔柱作用有关, 3.36~2.9 Ga 表壳岩与3.8~2.8 Ga 的变质杂岩与TTG 岩浆岩具有相同的构造背景, 是古陆核垂向增生的主要物质组成。华北克拉通东部广泛发育2.7~2.5 Ga 的TTG 岩浆岩^[4, 27]和新太古代鞍山岩群变质表壳岩(2.56~2.51 Ga)^[30], 具有岛弧火山-沉积建造特征, 揭示了古板块俯冲作用的存在^[30-32]。鞍山岩群中变质火山岩的原岩主要由拉斑玄武岩(2.55~2.52 Ga)、拉斑-钙碱性玄武岩(2.57~2.52 Ga)、钙碱性安山岩、高镁安山岩、钙碱性英安岩-流纹岩组成, 火山岩成分演化连续, 具有岛弧(2.57~2.52 Ga)、弧后盆地(2.55~2.52 Ga)地球化学属性^[30]。变质沉积岩

①中国地质调查局沈阳地质调查中心. 东北地区数据更新及地质编图项目报告. 2023.

②中国地质调查局沈阳地质调查中心. 东北地区基础地质图件更新课题报告. 2022.

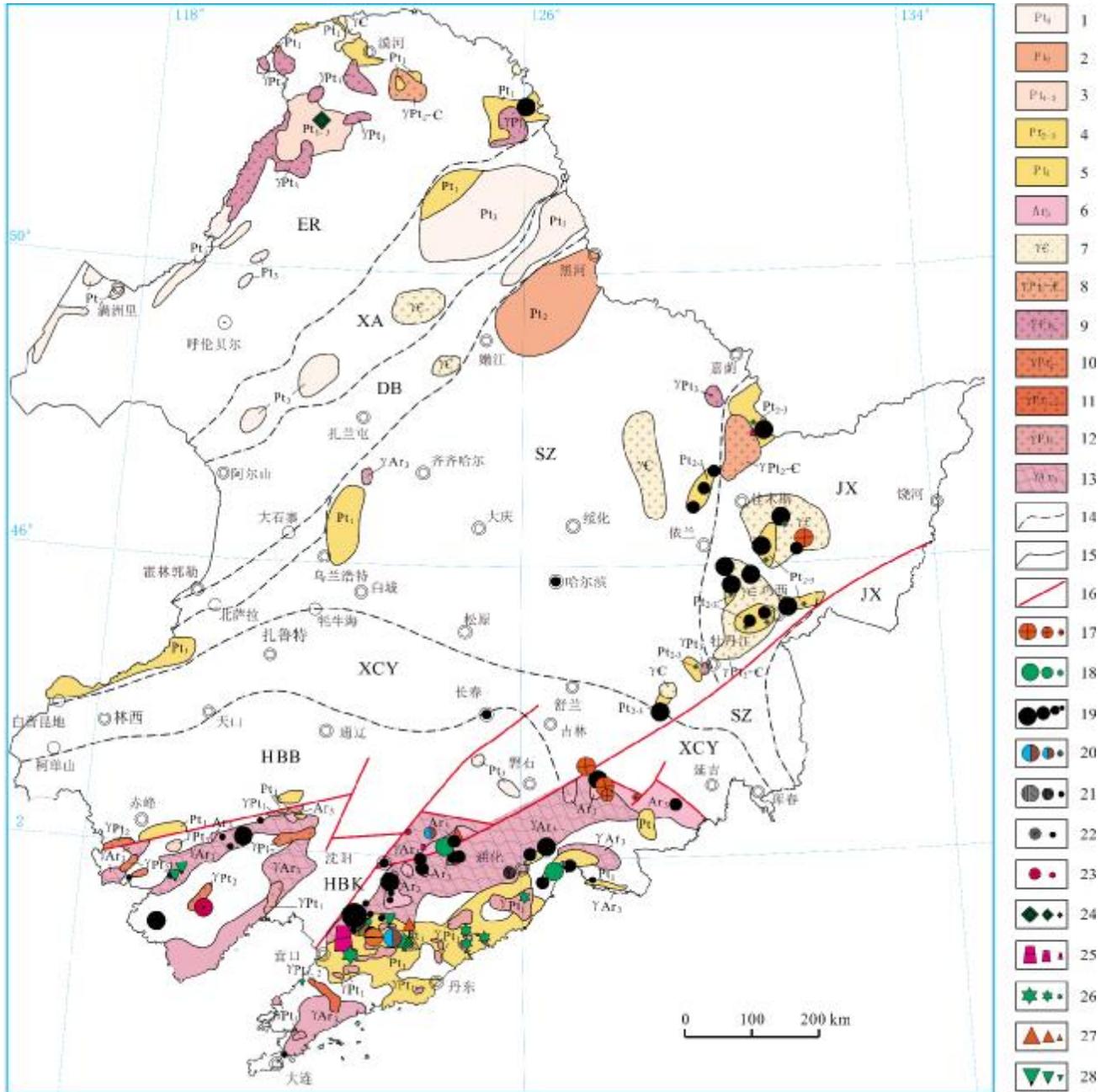


图2 研究区前寒武纪基底及矿产分布图

Fig. 2 Precambrian basement and mineral distribution in the study area

1—新元古界(Neoproterozoic); 2—中元古界(Mesoproterozoic); 3—古-新元古界(Paleo-Neoproterozoic); 4—中-新元古界(Meso-Neoproterozoic); 5—古元古界(Paleoproterozoic); 6—新太古界(Neoarchean); 7—寒武纪侵入岩(Cambrian intrusive rock); 8—中元古代-寒武纪侵入岩(Mesoproterozoic-Cambrian intrusive rock); 9—新元古代侵入岩(Neoproterozoic intrusive rock); 10—中元古代侵入岩(Mesoproterozoic intrusive rock); 11—古-中元古代侵入岩(Paleo-Mesoproterozoic intrusive rock); 12—古元古代侵入岩(Paleoproterozoic intrusive rock); 13—新太古代侵入岩(Neoarchean intrusive rock); 14—构造带边界(tectonic boundary); 15—地质界线(geological boundary); 16—断裂(fault); 17—金矿(gold deposit); 18—铜矿(copper deposit); 19—铁矿(iron deposit); 20—铅锌矿(lead-zinc deposit); 21—镍矿(nickel deposit); 22—铬矿(chrome deposit); 23—锰矿(manganese deposit); 24—石墨矿(graphite deposit); 25—菱镁矿(magnesite); 26—硼矿(boron deposit); 27—硫矿(sulphur deposit); 28—磷矿(phosphorite deposit)

和 BIF 主要形成于 2.56~2.51 Ga, 暗示鞍山、本溪地区在约 2.57 Ga 之前开启北东向南西的俯冲活动, 约

2.55 Ga 之前弧后盆地开始扩张^[30], 大面积分布的钾质花岗岩 (2.52~2.49 Ga) 可能形成于弧后伸展背景.

古板块的俯冲导致始太古代—中太古代古陆核发生侧向增生,岛弧(弧后)岩浆岩的大量侵位,焊接了古陆核,2.5 Ga的变质作用可能由2.7~2.49 Ga俯冲事件引发。至此,华北克拉通完成了始太古代—中太古代古陆壳垂向增生和新太古代侧向增生演化,形成了华北克拉通太古宙统一的结晶基底。

2.2 华北克拉通结晶基底演化阶段的成矿作用

华北克拉通伴随2次陆壳增生事件,发育两期BIF成铁事件^[31-32]。约3.10 Ga的BIF铁矿记录了华北克拉通最古老的BIF成铁事件,为华北克拉通垂向增生阶段产物,形成于古老陆壳上裂谷火山—沉积盆地,遭受后期强烈构造改造,分布零星。约2.55 Ga的BIF可能形成于古板块俯冲背景下的岛弧和弧后盆地环境^[30-32],保存较好,分布广泛,是我国最重要的沉积变质型铁矿产地之一,已探明东鞍山、西鞍山、齐大山、胡家庙子、眼前山、陈台沟、弓长岭、南芬、大台沟、思山岭等超大型铁矿和一批大、中型矿床,找矿潜力巨大。本溪矿集区的南芬、弓长岭、思山岭、北台、歪头山等铁矿产于茨沟岩组基性火山—硅铁建造中;鞍山矿集区的西鞍山、东鞍山、齐大山、西大背、陈台沟等铁矿及本溪大台沟铁矿产于樱桃园岩组硅—铁建造中。含磁铁变质碎屑岩是寻找沉积变质型铁矿床的重要标志,由于地表普查和勘探程度很高,进一步找矿难度较大,除工作程度相对较低的地段开展大比例尺矿产调查外,加强深部找矿更为重要。华北克拉通结晶基底内重、磁异常高值区是寻找该类矿床的重要找矿标志。1.8 Ga的辽—吉造山带碰撞阶段的变质作用改造了先期BIF建造,局部挤压应力和热作用可提高BIF铁矿的品位,含铁沉积岩系中规模较大褶皱构造核部和挤压变形带中是寻找富矿体的有利部位。

2.3 古元古代辽—吉造山带

华北克拉通古元古代经历了辽—吉造山带演化过程。辽—吉造山带主要物质组成以古元古代老岭群和集安群、北辽河群和南辽河群变质火山—沉积岩和大量古元古代花岗岩为主,并保存有洋岩石圈建造的基性—超基性岩岩块等^①。目前,已识别出增生杂岩和与俯冲有关的岩浆弧火成岩、与碰撞有关的花岗岩、后造

山背景的双峰式岩浆岩等^{②③}。

华北克拉通经历了古元古代辽—吉洋的裂解—拉伸—闭合及龙岗地块与辽南地块(狼林地块)碰撞过程,最终形成了古元古代辽—吉造山带^{④⑤}。目前的地质记录揭示辽—吉裂谷(洋)的裂解作用发生于2.53~2.36 Ga之间,2.47~2.3 Ga岩墙事件、辽—吉裂谷带的形成和双峰式火山活动^[33-34]记录了辽—吉洋演化的开始。关于古辽—吉造山带的成因,一是认为是与地幔柱有关的裂谷成因^[33];二是认为与古大洋俯冲有关^[34-35]。因此,也形成了不同的观点:一部分学者认为胶—辽—吉活动带的形成演化与陆内裂谷的闭合有关;另一部分学者则认为该活动带的形成演化与洋—陆俯冲、弧—陆碰撞有关。辽—吉造山带内发育的大量基性—超基性岩、硅质岩、斜长花岗岩、大理岩等,呈“岩块”状包圈在片麻岩、变粒岩“基质”中,宏观上构成典型俯冲增生杂岩;基性、超基性岩的地球化学特征具有LAT、E-MORB、N-MORB、OIB属性^[34-36],揭示了古大洋的存在;后仙峪硼矿区发现的科马提质玄武岩、硅质岩组合和辽河群、集安群内的麻粒岩,揭示了辽—吉古元古代造山带中曾经出现过洋壳和俯冲作用^[37-38]。辽—吉造山带内大量变质火山岩的原岩主要有玄武岩、安山岩、英安岩、流纹岩等,表现出成分连续演化特征,总体为钙碱性岩石系列,具有火山弧地球化学属性^[38-43],佐证了洋—陆俯冲事件的存在;辽吉造山带中花岗岩具有岩浆弧、碰撞—后碰撞、后造山构造属性^[34, 44-48],证实辽—吉造山带古元古代存在洋—陆俯冲和弧—陆碰撞事件。综合现有资料划分出早期被动陆缘盆地,中期俯冲增生杂岩、岩浆弧、弧后(间)盆地、弧前盆地,晚期的前陆盆地、(后)碰撞岩浆岩带、后造山岩浆岩带等构造单元。在此基础上,恢复了辽—吉造山带的演化过程^{⑥⑦⑧}:辽—吉造山带内保存的2.48~2.32 Ga钾质花岗岩和辉长岩(图3),反映了古辽—吉洋早期形成于裂谷伸展背景,可能是延续了华北克拉通2.55 Ga弧后伸展作用;2.34~1.95 Ga龙岗地块南缘沉积了一套滨海—浅海相大陆源火山—碎屑沉积岩建造(浪子山岩组、林家沟岩组新农村段、里尔峪组、高家峪组、大石桥组),揭示了龙岗地块南缘处于稳定(被动)的大陆边缘。2.23~1.95 Ga

①中国地质调查局沈阳地质调查中心. 辽东—吉中地区区域地质调查项目成果报告. 2022.

②中国地质调查局沈阳地质调查中心. 东北地区数据更新及地质编图项目报告. 2023.

③中国地质调查局沈阳地质调查中心. 东北地区基础地质图件更新课题报告. 2022.

发育大量的弧属性岩浆岩和火山岩-沉积岩,其中大量钙碱性弧属性的火山岩和花岗岩揭示了古辽-吉洋向南侧地块发生俯冲,形成南部岩浆弧带.岩浆弧中发育钙碱性火山岩(里尔峪组、蚂蚁河组)和广泛分布的I型花岗岩;在弧后伸展地区有基性岩脉、伟晶岩脉和A型花岗岩侵位,并沉积有高家峪组、大石桥组火山-沉积岩;到晚期弧岩浆岩明显减少,表明洋-陆俯冲作用逐渐减弱.2.02~1.96 Ga保存的地质记录很少,发育1.9~1.8 Ga麻粒岩相-角闪岩相变质作用^[49],指示古辽-吉洋趋于闭合,龙岗地块与辽南地块发生弧-陆碰撞.

1.95~1.88 Ga期间,辽-吉造山带内有后碰撞型花岗岩侵位,开始出现大量角闪岩相变质作用,揭示了由同碰撞进入到后碰撞演化阶段.早期弧-盆系和增生杂岩之上沉积有盖县组、花山组和临江岩组沉积岩系,其变质变形较弱,与下伏角闪岩相岩系形成明显的不整合,反映了同碰撞-后碰撞阶段残余盆地(前陆盆地)沉积建造特征.1.87~1.72 Ga变质作用进入高峰期(图3),后造山岩浆岩大量侵位,环斑花岗岩-正长花岗岩-正长岩等非造山侵入岩组合、伟晶岩脉、基性岩墙

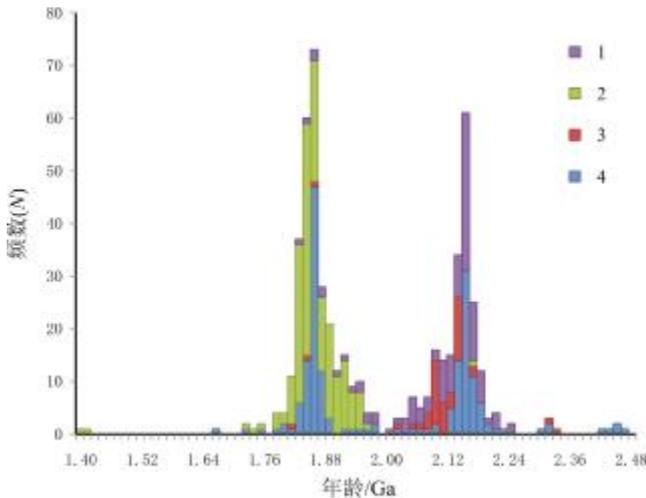


图3 辽-吉造山带各类岩石同位素测年分析结果统计直方图

Fig. 3 Statistical histogram for isotopic data of rock types in Liao-Ji orogenic belt

1—火山岩(volcanic rock); 2—变质岩(metamorphic rock); 3—基性侵入岩(basic intrusive rock); 4—花岗岩(granite)

群及变质分异花岗质脉体的产出,标志辽吉造山作用结束,华北克拉通进入后造山演化阶段.至此,华北克拉通褶皱基底形成,并最终形成稳定的克拉通基底.

2.4 古辽-吉洋演化过程的成矿作用

辽-吉造山带经历的洋-陆转换和陆-陆碰撞过程,混杂了大量洋壳、陆壳和地幔物质,汇集了丰富的成矿元素,为成矿作用提供了充分的矿源,同时形成了大量富水岩系,为成矿作用提供了流体.多期次构造岩浆活动,为成矿作用提供了充足的热源和动能(矿源),极大促进了区内矿产的形成.根据最新工作成果,与该带演化相关的矿产主要有硼(铁)矿、铁、铜(铁)钴矿、钴镍矿、硫化铁矿、菱镁矿、滑石矿、岫岩玉矿等(图2).其中硼矿储量约占全国储量的65%左右,已发现后仙峪、翁泉沟、砖庙、花园沟、杨木杆等大型硼矿床,二台子、大西岔等中型硼矿床和众多小型硼矿床.硼矿床主要产于辽河群里尔峪岩组、集安群蚂蚁河组富镁大理岩、超镁铁质岩和基性岩中.硼矿化分为镁橄榄岩型、橄榄玄武岩型和富镁大理岩型3种类型^[50],其中镁橄榄岩主要发育在碳酸盐岩中,具有异常低的Cr、Ni含量以及高含量的B,具有交代变质特征,其原岩可能受到了碳酸盐的交代作用.这种富镁碳酸盐多形成于地幔岩浆发育的洋岛或前弧环境,后仙峪和翁泉沟矿区发育的辉长岩、斜长岩也证实了洋壳残片的存在.含硼岩系中橄榄玄武岩的地球化学特征显示形成于大洋盆地^[45],3种类型的硼矿体均呈岩块(岩片)状产于强变形带(基质)中,具有典型俯冲增生杂岩特征^{①②③},暗示辽-吉造山带中的含硼建造可能形成于大洋盆地.

据研究^[51],硼的来源主要为古元古代变质基性、超基性岩和沉积岩及成矿流体,与古元古代辽-吉造山过程中的高温变质流体和角闪岩相变质作用有关.从富硼变质火成岩和沉积岩中浸出硼,富硼变质流体随后与海相蒸发富镁碳酸盐相互作用,形成硼酸盐沉积.区域变质及混合岩化作用、构造改造活动是硼矿形成的主要条件,辽东-吉南硼矿的成矿作用为原始火山-沉积初始富集和部分熔融含硼热液交代镁质岩

①中国地质调查局沈阳地质调查中心.东北地区数据更新及地质编图项目报告.2023.

②中国地质调查局沈阳地质调查中心.东北地区基础地质图件更新课题报告.2022.

③中国地质调查局沈阳地质调查中心.辽东-吉中地区区域地质调查项目成果报告.2022.

石的成矿作用过程^[52]。即古辽-吉洋内沉积变质和俯冲背景下的岩浆作用等导致含硼、含硅热液喷流,形成含硼建造。俯冲阶段增生楔、洋岛、洋内弧、洋中脊等洋内环境热点发育,形成的大量岩浆流体和热源均有利促进冷水中多硼酸盐富集成矿,尤其是橄榄岩与富硼海水的反应形成蛇纹石化过程极利于硼富集成矿,这与蛇纹岩中发育大量的硼矿事实符合。

一般俯冲或造山后伸展背景下岩石圈的减薄作用会促使大量地幔物质和热量输入陆壳中,大规模软流圈物质上涌、强烈的壳幔相互作用导致的岩浆活动、变质作用达到峰期,大量流体的形成、热源和大规模成矿作用,也会促进硼的富集成矿。从成矿年代上分析:砖庙硼矿形成年龄 1 902 Ma、1 918 Ma、1 869 Ma;翁泉沟硼矿形成年龄 1 852 Ma,围岩中金云母形成年龄 1 923 Ma、1 918 Ma;东台子硼矿形成年龄 1 917 Ma;喜鹊沟硼矿形成年龄 1 844 Ma^[53];后仙峪硼矿区夕卡岩成矿时代 1 838 Ma;翁泉沟地区铁-硼-铀矿床的铀矿化形成时代为 1 806 Ma;翁泉沟东台子和暖河堡硼铁矿品质铀矿成矿时代 1 862 Ma,围岩经历了 1 840~1 900 Ma 的变质作用^[54]。由此可见,辽-吉造山带主要硼矿区的岩浆事件、变质事件和成矿事件介于 1 950~1 806 Ma,揭示洋-陆俯冲、碰撞伸展 2 个阶段成矿作用的存在(图 3)。辽东地区硼矿床主要赋存在富镁碳酸岩和变质基性-超基性火成岩中,宏观上分别形成于由镁橄榄石经热液交代作用而形成的蛇纹岩和由含硼热液交代富镁大理岩形成的蛇纹岩中。热液交代形成的蛇纹岩在硼矿床中发育广泛,是直接的找矿标志^[52]。含硼建造多具有强磁性,地表找矿重点可选择辽-吉造山带内俯冲增生杂岩中洋壳残块发育地段,可利用磁法探测深部(高磁异常)隐伏矿体。

辽-吉造山带内菱镁矿、滑石矿也十分发育,主要产于弧后盆地沉积的大石桥组中。菱镁矿、滑石矿矿源主要来自富镁碳酸盐岩建造,多伴有基性岩浆活动^①。封闭-半封闭的弧后盆地、弧间盆地或弧背盆地为成矿提供了沉积场所,同期的火山作用为海水蒸发、热液富集运移沉淀成矿提供了热源和动力。菱镁矿产出于 2 种构造环境,一种发育在辽-吉造山带北部弧

后盆地大石桥组三段富镁碳酸盐岩中(营口地区菱镁矿),伴生大规模的基性火山喷发,形成多个规模较大的层控矿床;另一种产于南部弧间盆地或弧背盆地中的大石桥组高镁碳酸盐岩内(凤城偏岭、宽甸菱镁矿),伴有基性岩脉侵入,大部分卷入增生造山过程,受后期构造影响及热液叠加改造作用强烈,菱镁矿规模较小。滑石矿床伴随富镁碳酸盐岩产出,多为后期热液交代高镁碳酸盐岩而成矿。

岫岩玉主要产于南辽河群大石桥组富镁大理岩中,在里尔峪组镁橄榄岩中有少量产出,野外调研显示^{②③}。岫岩玉矿含矿建造以富镁大理岩岩块状产出,伴生斜长角闪岩(辉长岩、玄武岩)岩块,具洋岛岩石组合特征,多以洋壳残片形式卷入增生杂岩中;成因与洋岛或海底高原的地幔热柱活动有关。含橄榄石超基性岩与闪斜煌斑岩具有较高的 Cr、Ni、Co 含量,起源于地幔热点附近的部分熔融岩浆,断续的基性-超基性岩浆上侵、喷发,形成洋岛火山岩建造,而高镁岩浆及其热液与白云质岩石相互作用、交代蚀变形成了区内广泛的玉石矿化。一些玉石矿可以见到辉石橄榄岩和闪斜煌斑岩侵入大理岩,并在接触部位形成明显的玉石矿化,而且越靠近侵入岩边界玉矿的品质越好,以墨绿色蛇纹石玉+透闪石玉+黄白色透闪石玉为主。远离接触带玉石品质逐渐变差,依次出现深绿色透闪石玉+蛇纹玉(岫玉)、黄绿色白云石蛇纹石玉、淡绿色蛇纹石化大理岩,蛇纹石含量逐渐减少,而白云石含量逐渐增高。富镁大理岩、镁橄榄岩是岫岩玉的主要找矿标志,伴生基性、超基性岩,为一套高磁性岩石组合。寻找玉矿可优选增生杂岩中具高磁异常的高镁碳酸盐岩岩块。

关于辽-吉造山带中产出铜钴矿的构造环境也有了新的认识^④。一是产在构造带北部被动陆缘盆地沉积的高家峪岩组火山-沉积岩内,含矿岩石原岩为凝灰质砂质板岩、凝灰质板岩、凝灰质变质砂岩等,典型矿床有辽阳上华含铜钴黄铁矿矿床;二是产在构造带南部的原划“里尔峪岩组”,铜钴矿化主要发育在岩浆弧、增生杂岩内浅粒岩或浅粒岩-变粒岩的过渡带中,含矿建造以中性-基性火山岩及其碎屑-沉积岩建

①中国地质调查局沈阳地质调查中心. 辽东-吉中地区区域地质调查项目成果报告. 2022.

②中国地质调查局沈阳地质调查中心. 东北地区数据更新及地质编图项目报告. 2023.

③中国地质调查局沈阳地质调查中心. 东北地区基础地质图件更新课题报告. 2022.

造为主,代表矿床有于家堡子铜钴铁矿、海龙川铁钴黄铁矿、虎皮峪砷钴矿等;三是产在前陆盆地或残余盆地内的大栗子岩组内,含矿建造为浅海相含碳砂泥岩建造,代表性矿床有大横路铜钴矿;四是与基性岩脉有关的小女寨铜钴镍矿床.除了与基性岩脉有关的铜钴镍矿床外,铜钴矿主体矿层形态为层状、似层状、扁豆状或透镜状,经历了多期成矿作用叠加、改造,具有典型的层控矿床特征.矿床直接赋矿层的围岩地层通常分为2种,一是含火山物质的火山碎屑-砂泥质沉积建造,二是含碳砂泥岩建造,总体是还原环境的沉积建造.火山作用提供了原始的矿质沉积物源,砂泥质或炭质泥岩类岩石具有吸附Co、Cu金属物质的作用,形成最初的成矿物质富集层.除了层控矿化外,各矿区总体受褶皱控制,在褶皱转折端控制了富矿体的展布.变质作用也是促进矿化的有利因素,在矿石中常见金属硫化物及次生孔雀石化沿千枚理面分布,说明矿化经历了变质分异作用阶段,变质热液对矿体的进一步富集发挥了重要作用.

2.5 华北克拉通中元古代—早古生代盖层

华北克拉通于古元古代中期以后(1.85~1.8 Ga)进入哥伦比亚超大陆裂解阶段,辽-吉造山带与中部造山带之间发生裂陷-沉降,形成1.8~0.85 Ga裂陷型沉积建造和1.80~1.62 Ga的基性岩墙群.基性岩墙切割所有早前寒武纪变形形迹,揭示华北克拉通作为统一块体的最终形成与稳定^[55-56].之后,进入被动大陆边缘演化阶段.华北克拉通中元古代时期岩浆事件群记录了克拉通化后的裂解过程:1.80~1.77 Ga岩浆事件群标志着初始裂解,在这之后三大裂陷槽逐步打开;1.72~1.67 Ga、1.63~1.62 Ga岩浆事件群则是在中元古代早期持续裂解的表现,代表了哥伦比亚超大陆早期裂解的岩浆事件记录;而1.33~1.30 Ga期间以及1.23~1.20 Ga的岩浆事件代表了哥伦比亚超大陆的晚期裂解事件^[56].裂陷-沉降中心和华北克拉通北缘发育一系列中元古代—早古生代陆缘裂谷和陆表海盆地,接受了克拉通稳定盖层沉积.

中元古代早期—新元古代晚期(1.60~0.54 Ga)沉积了一套近连续的海相地层(陆源碎屑沉积岩和碳酸盐岩),岩石类型有白云岩、灰岩、石英砂岩、硅质岩、砂板岩等,含层状赤铁矿,形成数量众多、规模巨大的层控非金属矿床(白云岩矿、石英砂岩矿、大理岩矿、石灰

岩矿等)和沉积型铁矿.沉积型铁矿主要赋存于钓鱼台组、南芬组中,因总体变质程度低,铁矿品位偏低;石英砂岩矿主要发育在钓鱼台组、桥头组中;大理岩矿主要赋存于十三里台组;石灰岩矿主要发育在南关岭组、营城子组、十三里台组;白云岩矿主要发育在甘井子组.早古生代(541~458 Ma)陆缘盆地继续接受连续的海相沉积,岩石组合仍以陆源碎屑沉积岩和碳酸盐岩为主,发育丰富的白云岩矿、石灰岩矿、磷矿(通化市水洞磷矿)、铝土矿(本溪牛心台).华北克拉通沉积盖层的产状稳定,层控沉积矿产规模大,找矿标志明显,地表易追踪.此外,克拉通沉积盖层总体为一套富水岩系,碳酸盐岩发育,为后期(古生代—中生代)岩浆热液(夕卡岩型)成矿提供了良好的矿源和流体.

3 东北地区古生代构造演化与成矿作用

3.1 兴-蒙造山带构造演化与成矿作用

兴-蒙造山带在东北地区主要由古亚洲洋(新元古代—古生代)北向俯冲导致西伯利亚板块向南增生形成的一系列弧-盆体系、增生杂岩和卷入其内的裂离地块组成.地块间的分割洋盆向两侧地块俯冲,形成了结合带和多期次构造-岩浆活动,同时伴生了丰富的矿产资源.笔者等通过几年来的系列编图、综合研究,分解出地块残块、地块被动陆缘盆地、结合带、岛弧、弧后盆地、残余盆地、前陆盆地和碰撞岩浆岩带等构造单元,在此基础上,进一步恢复了古亚洲洋构造域的洋-陆转换过程.

3.1.1 兴-蒙造山带中地块基底

兴-蒙造山带中发育有大小不等的古老地块残块,其内伴生大量铁矿、石墨矿等资源,吸引了众多地质学家的关注.目前,大致查明了地块基底的岩石组合、形成时代、成因及含矿性.但地块基底岩石的原岩成分较复杂,虽以火山岩和沉积岩(碳酸盐岩)为主,但地球化学背景却有岛弧(弧后盆地)、裂谷-被动陆缘、板内等不同特征,且各类岩石的形成时代也不尽相同(608~2 791 Ma),暗示地块基底经历了不同构造阶段或背景的演化.新的资料揭示各地块均保存有前寒武纪地质记录,包括古老的表壳岩、弧岩浆岩、蛇绿岩等,地块边缘叠加有古生代活动陆缘建造的弧-盆系.在额尔古纳地块中发现有新太古代岩浆岩(2 606 Ma)^[57]和古元古代—新元古代岩浆岩(1 837 Ma、795 Ma)^[58-59],松

嫩地块发现有新太古代岩浆岩(2 579 Ma、2 699 Ma)^[60-61]和古元古代—新元古代岩浆岩(1 808 Ma)^[62],在兴安地块中发现有古元古代—新元古代岩浆岩(2 096 Ma、1 394~1 048 Ma)^①,在海勒斯台增生杂岩中发现新太古代(2 544 Ma)黑云角闪石英闪长岩岩块^②,在锡林浩特岛弧中发现了古元古代岩浆岩(1 516 Ma)^[63].同时在额尔古纳地块发现了 1 847 Ma、1 429 Ma 变质表壳岩,在兴安地块中发现了 520 Ma、546 Ma 变质表壳岩^[14],在松嫩地块南部新发现了 1 803 Ma、1 431 Ma、2 170 Ma、1 839 Ma、821 Ma 变质表壳岩^[14,64],在佳木斯地块发现了 1 151 Ma、929 Ma、2 170 Ma 变质表壳岩^[65].

古元古代中期以后哥伦比亚超大陆裂解,华北克拉通、西伯利亚克拉通进入被动大陆边缘演化.随着裂解程度加大,两个克拉通逐渐分离,古亚洲洋相继形成,并持续扩张.克拉通边缘裂解下来的早前寒武纪基底块体以裂离地块或岛弧形式分散在古亚洲洋中.额尔古纳地块、松辽地块、佳木斯地块基底中的新太古代、古元古代岩浆岩和古元古代表壳岩与两侧克拉通结晶基底岩石组合及时代可对比,显示从克拉通基底中裂离下来残块特征.新元古代—早古生代早期游离在古亚洲洋中的地块开始相互汇聚,地块间的局限洋盆(新林洋、黑龙江洋等)陆续向两侧地块俯冲,形成一系列增生杂岩和活动陆缘建造.额尔古纳地块、头道桥—新林结合带、兴安古岛弧、伊尔施—三卡结合带、松辽地块、佳木斯地块等中发育的 1 394、1 048、795、510 Ma 岩浆岩和增生杂岩揭示了地块的侧向增生作用.洋盆俯冲之前和俯冲洋盆背侧的地块边缘及基底之上发育有早古生代被动陆缘沉积盖层,如松嫩地块上沉积的寒武系第二统一苗岭统老道庙沟组—晨明组、上奥陶统小金沟组陆表海沉积、上志留统大青组双峰式火山岩建造、中—下泥盆统黑龙江组—宝泉组(小北湖组—歪鼻子组)火山—沉积建造,兴凯地块之上的寒武系苗岭统金银牌组陆表海沉积,佳木斯地块之上的上奥陶统石灰窑子岩群陆表海沉积、中下泥盆统黑台组—老秃顶子组被动陆缘火山—沉积建造,额尔古纳地块之

上的新元古代加疣组组和额尔古纳河组等,均揭示了各地块的被动陆缘垂向增生过程^{③④}.这些富水的垂向增生沉积建造为后期岩浆热液型成矿作用提供了良好矿源和流体,区域上发育众多的多金属矿均与其有关(如伊春地区老道庙沟铅锌矿、小西林铅锌银矿)(图1).

各地块的基底中保存的前寒武纪表壳岩、弧岩浆岩(608~2 791 Ma)等普遍遭受麻粒岩相、角闪岩相变质作用,与两侧克拉通基底具有一定亲源性,但其变质时间普遍偏新.松辽地块变质年龄 424~490 Ma^[66],佳木斯地块变质年龄 500 Ma,兴凯地块变质年龄 490 Ma,兴安地块变质年龄 496~494 Ma,额尔古纳地块变质年龄 496 Ma,总体揭示了泛非期变质事件的存在^[67].各地块中均发育不同程度的 550~510 Ma 岩浆作用,这些岩浆岩大部分遭受了约 500 Ma 变质作用改造,表明东北地块群具有相同的泛非期变质结晶基底^[67].地块基底中的变质作用、岩浆作用时间与克拉通基底的差异性,说明地块基底的变质结晶作用是地块裂离到古亚洲洋中后期形成的,可能与洋底变质或洋壳俯冲作用有关;伴生的 550~460 Ma 岩浆岩大部为具有弧属性的钙碱性岩石,同时也发育有这一时段的俯冲增生杂岩^[13-14],表明地块基底的变质结晶作用受到了洋壳俯冲作用影响.

3.1.2 兴—蒙造山带地块基底演化过程中的成矿作用

各地块基底在后期俯冲增生和碰撞造山过程以残块或岩片形式卷入造山带内,经历了复杂的构造岩浆热事件的改造.其间形成了众多的矿产资源,以沉积变质铁矿、石墨矿、夕线石矿、大理岩矿为主(图2),同时也是区域上金及多金属矿的主要矿源层,如额尔古纳地块兴华渡口岩群金丰度普遍较高,是大兴安岭地区岩金及砂金矿的主要矿源层之一.沉积变质铁矿主要产于佳木斯地块变质基底兴东岩群(羊鼻山铁矿、羊胡山铁矿、城海铁矿)、松嫩地块东风山岩群(东风山铁矿、东风林场铁矿、亮子河铁矿)、额尔古纳地块兴华渡口岩群磁铁石英岩和斜长角闪岩中(兴安桥铁矿、三河屯铁矿);石墨矿、夕线石矿主要产于佳木斯地块变质基底麻山岩群(柳笔石墨矿—夕线石矿、麻山石墨矿、

①内蒙古自治区地质调查院. 1:25 万扎兰屯市幅区域地质调查报告. 2006.

②福建省地质调查研究院. 1:5 万牛汾台林场等四幅区域地质调查报告. 2019.

③中国地质调查局沈阳地质调查中心. 东北地区数据更新及地质编图项目报告. 2023.

④中国地质调查局沈阳地质调查中心. 东北地区基础地质图件更新课题报告. 2022.

黑台石墨矿、鹤岗石墨矿、锅盔山石墨矿)、额尔古纳地块兴华渡口岩群(霍拉盆石墨矿)孔兹岩系(石墨夕线石堇青片麻岩、含石墨大理岩、石墨片岩、夕线石榴片麻岩)中.空间上形成一条北西向断续分布1300 km的泛非期(约500 Ma)孔兹岩带^[67],找矿潜力较大,找矿标志明显,以岩层控矿为主,地表易于追索,深部可采用磁法和电法探测高磁异常和高极化异常.

3.1.3 兴-蒙造山带中地块间结合带

兴-蒙造山带中的各地块自新元古代一中二叠世先后发生汇聚拼贴,地块间分割的洋盆相继消减形成以俯冲增生杂岩为主的结合带,由老到新划分为头道桥-新林结合带、伊尔施-三卡结合带、贺根山-黑河结合带、嘉荫-牡丹江结合带、同江-跃进山增生杂岩带等5条结合带^{①②},结合带两侧发育一系岛弧带和弧后盆地,伴生有大量矿产资源.

1) 头道桥-新林结合带

头道桥-新林结合带呈北东向展布在额尔古纳地块与兴安地块(弧-盆系)之间(图1),南西始于头道桥,东北端至新林东部一带,长约800 km,相当于区域普遍认为的头道桥-新林蛇绿岩带.研究程度较高,目前已共识是两地块间新林洋盆闭合形成的俯冲增生杂岩带.

俯冲增生杂岩主要由头道桥、吉峰、环宇、新林、兴隆等数个基性-超基性岩等岩块和构造片岩、千枚岩等变形基质组成.岩块成分主要有变玄武岩、蓝片岩、辉长岩(辉绿岩)、放射虫硅质岩、大理岩、蛇纹岩、滑石岩、角闪石岩、橄榄岩、辉石岩,基性、超基性岩块的岩石地球化学具有E-MORB、N-MORB、OIB等大洋板内及洋内弧(LAT、IAB)特点^[14].该结合带作为洋盆消失的遗迹记录了新林洋洋-陆转换过程,其内洋壳残片的年龄(696~511 Ma)指示洋盆最早形成于新元古代.俯冲增生杂岩基质中碎屑锆石年龄最小丰值(<458 Ma、<624 Ma)和同沉积的火山岩年龄(498 Ma)揭示寒武纪苗岭世洋盆开始发生俯冲,持续到晚奥陶世^[14].结合带北侧保存的寒武纪第二世一早奥陶世岩浆弧(521~472 Ma)和地块基底抬升,揭示洋盆向北侧额尔古纳地块俯冲开始于寒武纪第二世.485~472 Ma岩浆弧集中发育,指示奥陶纪为主要俯冲增生阶段^[14].晚

奥陶世晚期弧前盆地(安娘娘桥组)不整合覆盖在俯冲增生杂岩带和早一中奥陶世弧前盆地之上,标志新林洋在晚奥陶世晚期消减结束.晚志留世一早泥盆世残余海盆(卧都河组、泥鳅河组)不整合于头道桥-新林俯冲增生杂岩带及奥陶纪弧-盆系之上,证明头道桥-新林弧后洋盆地在晚志留世之前闭合.

2) 伊尔施-三卡结合带

伊尔施-三卡结合带是笔者等最新划分出的三级构造带^[14,68],展布于兴安地块(弧-盆系)和松嫩地块之间(图1),相当于兴安地块(弧-盆系)和松嫩地块之间洋盆消减后的地块间结合带,南西端始于伊尔施,东北端至呼玛三卡一带.俯冲增生杂岩主要从原划北宽河岩组、嘎拉山岩组、兴华渡口岩群、加疙瘩岩组、铜山组等变质变形较强的部分及其中的刚性体(岩块)解体而出.基质主要为构造片岩、千枚岩、变质凝灰岩等.岩块主要有硅质岩、变玄武岩、细碧岩-角斑岩、大理岩、斜长角闪岩、苦橄岩、辉石橄榄岩(蛇纹岩)、辉长岩、高镁安山岩等.基性-超基性岩岩块的地球化学具有洋岛、洋中脊、洋内弧、岛弧等构造属性^[68].洋壳残片、洋内弧、洋岛残片等揭示了古大洋的存在,其内岩块(526~463 Ma)年代学资料揭示洋壳形成于寒武纪第二世一中奥陶世,具洋中脊属性的岩块(526~490 Ma)记录了寒武纪第二世-芙蓉世洋中脊扩张事件,具洋岛属性的岩块(485 Ma)记录了早奥陶世洋盆内的地幔柱活动.基质石英片岩中碎屑锆石最小年龄为470、485 Ma,揭示洋盆和海沟沉积作用持续到早奥陶世之后;卷入基质内南侧弧前盆地沉积的片岩中碎屑锆石峰值年龄为449~455 Ma,反映洋盆持续俯冲作用延续到晚奥陶世之后;弧前盆地同沉积凝灰岩中锆石结晶年龄为457~461 Ma,揭示洋盆在晚奥陶世仍存在俯冲作用^[14].多宝山铜钼矿区内保存的506~485 Ma高镁玄武岩、高镁玄武安山岩^[69],记录了洋盆内初始俯冲时间为寒武纪苗岭世.

多宝山-三卡俯冲增生杂岩带南东侧寒武纪第二世一早奥陶世岩浆弧(513~485 Ma),记录了洋盆向南东侧地块边缘的俯冲时间始于寒武纪第二世.早奥陶世-兰多维列世岩浆弧(484~425 Ma)出露较多,反映这一时期岩浆活动较为强烈.早奥陶世-罗德洛世弧

①中国地质调查局沈阳地质调查中心.东北地区数据更新及地质编图项目报告.2023.

②中国地质调查局沈阳地质调查中心.东北地区基础地质图件更新课题报告.2022.

前盆地、弧间(背)盆地暗示俯冲增生作用持续到罗德洛世。普里道利世一中泥盆世残余盆地大面积不整合覆盖在早奥陶世—罗德洛世弧-盆系之上,表明洋盆在中泥盆世之前俯冲作用结束。普里道利世可能受洋岛或洋底高原的阻止俯冲作用,消减作用减弱,增生楔处发生阻塞导致俯冲作用减弱或停滞,两侧地块未发生碰撞对接,局限洋盆残余在地块之间,残余洋盆和早期弧-盆之上接受残余海盆沉积,至中泥盆世残余海盆相继关闭。晚泥盆世—早石炭世受嫩江洋的北西向俯冲作用影响,多宝山岛弧区遭受挤压,在多宝山早古生代弧-盆系之上叠加前陆盆地沉积,结束了多宝山地区早古生代弧-盆体系演化。

海勒斯台-扎兰屯俯冲增生杂岩带产出在东乌旗-多宝山岛弧带内(图1),呈北东向展布,北邻伊尔施-三卡结合带,是多宝山洋盆早期南向俯冲增生产物,由海勒斯台俯冲增生杂岩和扎兰屯俯冲增生杂岩组成^[14]。海勒斯台俯冲增生杂岩基质从原铜山组(砂质糜棱岩、糜棱片岩等)解体而出,其基质沉积下限为501-512 Ma。岩块组成为:洋岛辉长岩(478 Ma)、玄武岩、角闪石岩;洋中脊辉长岩(463 Ma)、玄武岩;岛弧安山岩(464 Ma)、闪长岩(512 Ma)、花岗闪长岩(540 Ma);基底残块石英闪长岩(2 544 Ma)等^①。扎兰屯俯冲增生杂岩的基质由原兴华渡口岩群(黑云石英片岩、二云石英片岩和粉砂质糜棱岩)解体而出,其基质沉积下限为503~514 Ma;岩块包括前弧富铌玄武岩、高镁闪长岩,洋脊玄武岩(524 Ma)、辉绿岩(523 Ma),岩浆弧玄武岩、安山岩(508 Ma)等^②。岩浆弧位于增生杂岩带东南侧,形成时代为464~508 Ma,揭示俯冲时代为苗岭世—中奥陶世,显示洋盆地向东南侧俯冲,与伊尔施-三卡俯冲增生杂岩带俯冲极性相同。

通过对多宝山岛弧早古生代沟-弧-盆体系恢复,进一步解释了多宝山岛弧带的成因和成矿作用^[68]。多宝山岛弧带中发育多宝山铜钼矿、铜山铜钼矿、争光岩金矿等超大型、大型铜钼金矿(图1),成矿时代均为早奥陶世^③。从板块构造成矿理论分析,岛弧靠近增生楔附近是成矿流体和热源发育地区,洋、陆物质混杂后成矿物质得以富集,利于成矿。多宝山地区的铜钼金矿

床集中分布在岛弧靠近增生楔部位,且由北西向南东依次发育多宝山铜钼矿、铜山铜钼矿、争光岩金矿,三者均产于弧岩浆岩中,成矿规模从北西向南东依次变小,成因类型由斑岩型向浅成低温热液型转变,揭示了由南东向西北方向成矿作用逐渐增强的特点。靠近俯冲增生杂岩带附近受洋壳俯冲作用影响,仰冲板块抬升,岩浆弧和地块基底也相应隆起,并向陆缘方向倾斜。同时来自深源的岩浆上侵动能向岩浆弧后缘逐渐减弱,侵入火山弧内的高位岩浆房的规模和高度也随着减小。岩浆成矿作用随之减弱,深度相对增加,导致成矿深度向火山弧后缘增大。从多宝山铜矿→铜山铜矿→争光岩金矿成矿深度依次增大,成矿深度变化与北西侧洋盆向南东方向俯冲机制吻合。

仰冲板块抬升导致高位岩浆弧含矿侵入岩隆升,剥蚀后出露地表(多宝山铜钼矿),上覆含矿火山岩被剥蚀到两侧盆地中,在盆地沉积岩系中形成铜钼等多金属地球化学异常;就位较低的岩浆弧,因比降小而剥蚀作用弱,含矿侵入岩和上覆含矿火山岩均得以保存,由斑岩型(铜山铜钼矿)向浅成低温热液型(争光岩金矿)过渡,形成浅部成金矿、深部成铜钼矿的分带特点。区域找矿应加强多宝山岛弧带北西侧的探测工作。

3) 贺根山-黑河结合带

贺根山-黑河结合带分布于东乌旗-多宝山岛弧带与松嫩地块之间(图1),为贺根山-嫩江洋闭合后形成的弧-陆结合带^[13-14],总体呈北东向展布,由贺根山一带经霍林郭勒、大石寨延伸到黑河地区,东北地区由北部大石寨-黑河俯冲增生杂岩带、中间西乌旗岛弧带、南侧北萨拉-碾子山俯冲增生杂岩带构成^[15-16]。南北2条俯冲增生杂岩带近平行状分布,两者的物质组成和形成时间基本相同。2条俯冲增生杂岩带均产出有蛇绿岩岩块和变形基质,岩块主要有大理岩、硅质岩、含铁碧玉岩、玄武岩、蛇纹石化辉石橄榄岩、辉长岩等,基性-超基性岩块产有岩浆型铬铁矿、蛇纹岩矿等(如科右前旗大型铬铁矿、蛇纹岩矿)。基质主要从原中晚泥盆世—晚石炭世变质岩系中解体而来,以糜棱岩化砂岩、砂泥质糜棱岩、片理化砂板岩等为主^[13-14]。岩块中含有较多的439~407 Ma玄武岩(细碧岩)、绿

①福建省地质调查研究院. 1:5万牛汾台林场等四幅区域地质调查报告. 2019.

②中国地质调查局沈阳地质调查中心. 松辽盆地西缘扎赉特-巴林左旗区域地质调查项目成果报告. 2023.

③中国地质科学院地质研究所. 北方东部复合造山成矿系统深部结构与成矿过程项目报告. 2022.

泥白云片岩(变流纹岩),其岩石地球化学具有洋中脊、洋岛、大洋板内环境特征,揭示了贺根山-嫩江洋盆形成于早志留世^{[13-14] ①②}。具有洋中脊、洋岛、洋内弧地球化学属性的角闪石岩、橄榄岩、辉长岩、闪长岩、镁安山岩、玄武岩等岩块的锆石 U-Pb 年龄分为 3 个阶段:晚泥盆世(362~374 Ma)、早石炭世(333~348 Ma)、晚石炭世—早二叠世(289~323 Ma),揭示晚泥盆世—早二叠世期间洋中脊不断扩张,并发生洋内俯冲和地幔热柱活动,形成多期洋岛、洋内弧和新生洋壳^[13-14]。具洋内弧特征的镁安山岩锆石 U-Pb 年龄为 346 Ma,揭示早石炭世发生过洋内俯冲作用^[13-14]。俯冲增生杂岩带的两侧均保存有早石炭世—早二叠世的岩浆弧,其火山弧、侵入弧及弧前、弧间、弧后(残余)盆地,揭示了贺根山-嫩江洋盆向两侧陆缘的双向俯冲特征^③。

结合带北西侧呼伦贝尔-牙克石一带发育有晚泥盆世-晚石炭世-早二叠世岛弧岩浆作用有关的金铜及多金属矿(巴林接触交代型铜锌矿、罕达盖林场夕卡岩型铁铜多金属矿、鄂温克旗热液型铍矿、梨子山接触交代铁铜矿、鄂温克旗中道山接触交代型铁矿、谢尔塔拉火山岩型铁矿、六一火山沉积型硫铁矿等),南侧仅发现黑河市付地营子早一中泥盆世小型火山岩型铜锌硫铁矿,显示洋盆北北向俯冲作用强于南东向俯冲,指示结合带北西侧弧-盆系是成矿有利地段。弧岩浆岩锆石 U-Pb 年龄分为 3 个阶段:早石炭世(333~353 Ma)、晚石炭世(299~323 Ma)、早二叠世(271~297 Ma),表明贺根山-嫩江洋盆向两侧陆缘的俯冲作用始于早石炭世,终于早二叠世。弧前盆地中变酸性火山岩夹层 U-Pb 年龄(313 Ma)显示为晚石炭世,残余盆地砂岩中的碎屑锆石年龄(<270~298 Ma)显示沉积下限为早二叠世,指示残余盆地沉积时代在早二叠世以后。俯冲增生杂岩带被中一晚二叠世残余盆地不整合覆盖^④,俯冲增生杂岩带附近未出露碰撞型岩石记录,但附近先期地质体多发生了动力变质作用。在嫩江镇西的莫力达瓦旗额尔和乡蒋屯村红山梁地区下石炭统核桃山组变酸性火山岩中发现有蓝闪石片岩^⑤,说明洋盆消减结束后,局部发生弧-陆碰撞,中一晚二叠世转化成残余盆地。

笔者等在乌兰浩特东呼和马场一带发现一套增生杂岩,发育岩块和基质。基质由黑云石英片岩、黑云斜长片岩组成,夹变英安质凝灰岩;岩块由蛇纹石片岩、蛇纹石化橄榄岩、橄榄岩组成。蛇纹石片岩包围着蛇纹石化橄榄岩、橄榄岩。在变英安质凝灰岩、黑云斜长片岩中分别获得了 301、295 Ma 岩浆型锆石 U-Pb 谐和年龄,记录了晚石炭世—早二叠世俯冲增生事件;在橄榄岩中获得了 390 Ma 岩浆型锆石 U-Pb 谐和年龄,与贺根山-黑河结合带内获得的 362~374 Ma、414~419 Ma 洋内弧、洋中脊、洋岛等洋壳残片时代基本相近,表明呼和马场一带存在中泥盆世洋盆^⑥。

4) 同江-跃进山结合带

同江-跃进山结合带分布于佳木斯地块东缘(图 1),呈近南北向展布,相当于以往工作划分的跃进山增生杂岩带。研究程度较高,杂岩中基质和不同成因类型的岩块(岩浆岩)均有同位素测年和地球化学样品控制。该结合带主要由同江增生杂岩和跃进山增生杂岩两部分构成,相当于佳木斯地块东缘古亚洲(跃进山洋)西向俯冲产物^[19],部分研究者认为是古太平洋俯冲产物。增生杂岩由变形基质和岩块组成。基质从原跃进山群、部分完达山群解体而来,主要为一套变形强烈的石英片岩、绢云千枚岩等构造片岩(原岩为深海硅泥质岩)^{[25] ⑦⑧};岩块主要组成为超镁铁质岩,具有 E-MORB 和 N-MORB 特征的辉长岩及玄武岩,具 FAB 特征的玄武岩及富铌玄武岩,具有洋内弧属性的玄武岩、安山岩,洋岛大理岩及玄武岩,洋壳硅质岩等^{[25,70] ⑨⑩},显示了古洋壳残片特征。岩块中辉长岩、玄武岩、安山岩(闪长岩)的时代为 232~303 Ma^[70-77],岩浆弧的时代在 263~305 Ma 之间^[25,70,78]。佳木斯地块东缘保存的早-中泥盆世被动陆缘火山-沉积盆地(黑台组、老秃顶子组)(392 Ma)^[77],晚石炭世—晚二叠世火山弧(二龙山组、杨岗组)、侵入弧(263~305 Ma)和弧后盆地(珍子山组)^[19,77],指示洋盆向佳木斯地块东缘俯冲起始时间在早石炭世以后,晚石炭世—晚二叠世为主要俯冲阶段。蛤蟆通一带保存有晚三叠世玄武岩岩块(232 Ma)和基质(最年轻的碎屑锆石年龄为 223 Ma)^[74],岩浆弧被上三叠统南双鸭山组不整合覆

①中国地质调查局沈阳地质调查中心. 东北地区数据更新及地质编图项目报告. 2023.

②中国地质调查局沈阳地质调查中心. 东北地区基础地质图件更新课题报告. 2022.

③中国地质调查局沈阳地质调查中心. 松辽盆地西缘扎赉特-巴林左旗区域地质调查项目成果报告. 2023.

盖,指示俯冲增生作用最晚可能持续到晚三叠世.糜棱岩化绿泥石-绢云母板岩的绢云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测试结果为193 Ma,根据跃进山杂岩中最年轻的原岩时代约为220 Ma,限定了跃进山杂岩的最终就位时代为220~193 Ma^[70].晚三叠世至早侏罗世期间,由于古太平洋板块西向俯冲,部分杂岩作为岩块和再改造基质卷入到完达山增生杂岩中.

5) 嘉荫-牡丹江结合带

该带介于佳木斯地块和松嫩-张广才岭地块之间(图1),呈近南北向展布,相当于两地块间牡丹江洋闭合形成的结合带.物质组成和构造位置相当于以往工作划分的“吉林-黑龙江高压变质带”^[79]、“黑龙江杂岩带”^[80].前人对增生杂岩中岩块、基质及两侧地块岩浆弧的形成时代、变质时代、岩石成因等作了大量研究,恢复了牡丹江洋的演化过程^[25, 78, 80-81],但目前对牡丹江洋是归属古亚洲洋体系还是归属古太平洋体系还存有争议.结合带由嘉荫、依兰、桦南、道河、牡丹江、向阳、虎林、四山、杨木、五道沟等增生杂岩构成.增生杂岩普遍发育变形基质和岩块,基质主要从原黑龙江岩群、张广才岭岩群、五道沟群、黄松岩群、塔东岩群、平阳镇组等构造岩石地层中解体而出,由片岩、糜棱岩、糜棱片麻岩、蓝片岩、千枚岩等组成.原岩主要为海沟和弧前盆地硅泥质岩和砂泥质岩^[25, 82]①.目前识别出来的岩块组分主要有洋中脊蛇纹岩、玄武岩(斜长角闪岩),洋内弧斜长角闪岩,深海硅质岩,洋岛玄武岩+大理岩、蓝片岩、斜长角闪岩、绿片岩,裂离地块片麻岩等^[25, 76, 78, 81-89].岩块中基性-超性岩形成时代主要集中在251~293 Ma,经历了160~230 Ma的变质作用改造^[87];基质中碎屑锆石最小峰值年龄在240~280 Ma之间,经历了180~240 Ma变质作用.揭示牡丹江洋俯冲时间集中在早二叠世早期-早三叠世早期.结合带两侧均发育有早石炭世-晚二叠世侵入弧(253~326 Ma)^[25, 77-78]、晚石炭世-晚二叠世火山弧(唐家屯组、青龙屯组、五道岭组)和弧后盆地(杨木岗组、马滴达组、交界屯组、土门岭组、红山组)^②,指示牡丹江洋盆俯冲作用可能起始于早石炭世;西侧松嫩-张广才岭地块保存有石炭纪弧-盆体系,指示早期洋盆以西向俯冲为主;两侧地块边缘均发育早二叠世早期-晚

二叠世弧-盆建造,并有地块基底片麻岩出露(抬升),显示这一阶段牡丹江洋盆以双向俯冲作用为主.结合带两侧普遍缺少早-中三叠世地质建造,暗示这一时期可能进入碰撞阶段.沿结合带两侧发育大规模近南北向的晚三叠世-早侏罗世岩浆岩带(200~230 Ma),有研究者认为牡丹江洋早中生代仍存在俯冲.但区域上发育有晚三叠世大酱缸组、马鹿沟组类磨拉石建造,且这一时段岩浆活动与岩块和基质中的变质年龄基本一致,总体揭示了牡丹江洋消减结束、佳木斯地块和松嫩-张广才岭地块进入碰撞-后碰撞、后造山过程.综上所述,两地块可能在230 Ma左右发生碰撞,晚三叠世-中侏罗世受古太平洋俯冲作用影响,后碰撞-后造山可能持续到160 Ma左右^[25, 78].

嘉荫-牡丹江结合带两侧发育有200~210 Ma斑岩型和夕卡岩型矿床,如铁力前进东山夕卡岩型Pb-Zn-Cu矿床(209 Ma)、石林公园斑岩型Mo-W矿床(208 Ma)、石林公园南山斑岩型Mo-W矿床(200 Ma)、洋灰洞子斑岩型Cu矿床(201 Ma)、小西林岩浆热液型Pb-Zn矿床(209 Ma).成矿区带呈近南北向展布,平行于嘉荫-牡丹江结合带,成矿时代响应了后碰撞阶段的岩浆成矿作用.

3.2 西拉木伦-长春-延吉对接带

3.2.1 古亚洲洋闭合阶段构造演化

西拉木伦-长春-延吉对接带分布于华北板块与西伯利亚板块之间,是笔者等依据原西拉木伦-长春-延吉一带发育的蛇绿岩、构造片岩等俯冲增生杂岩和其间弧-盆系等建造厘定的一级大地构造单元^[13-14]②.在西拉木伦一带划分出南北2条俯冲增生杂岩带:北部为白音昆地-牯牛海俯冲增生杂岩带,南部为柯单山-天山俯冲增生杂岩带,其间叠加有中二叠世林西-扎鲁特残余盆地(哲斯组);在长春-延吉一带对应划分出南北2条俯冲增生杂岩带:北部为白城-珲春增生杂岩带,南部为长春-开山屯增生杂岩带,其间叠加有中二叠世吉林-敦化残余盆地(范家屯组、于家北沟组、烧锅屯组、庙岭组、寺洞沟组)(图1).同时划分出一系列配套的早二叠世火山弧(大石寨组、大河琛组、佟家屯组、窝瓜地组、关门咀子组)、弧间盆地(弧后盆地)建造(寿山沟组、三面井组、照北山组),晚二叠世-

①中国地质调查局沈阳地质调查中心.东北地区数据更新及地质编图项目报告.2023.

②中国地质调查局沈阳地质调查中心.东北地区基础地质图件更新课题报告.2022.

早三叠世前陆盆地(林西组、杨家沟组、开山屯组、老龙头组、卢家屯组、楼家围子组、林家组、柯岛群、红砬组、后富隆山组)^[13-14]^{①②}和早一中三叠世碰撞-后造山岩浆岩等^[90-91]^②。

西拉木伦-长春-延吉对接带东、西两段增生杂岩带、弧-盆系、残余盆地、碰撞-后造山岩浆岩带可以对比连接^②。对接带产出在兴-蒙造山带(松嫩张广才岭地块)和华北板块北缘造山带(白乃庙岛弧)对接部位,作为古亚洲洋消失的遗迹记录了大兴安岭弧-盆系和华北板块北缘陆缘增生带对接和洋-陆转换过程。其内代表洋壳残片的基性-超基性岩块的同位素年龄(492~465 Ma、416~362 Ma、345~302 Ma、298~270 Ma)指示洋盆最早形成于寒武纪芙蓉世,经历了奥陶纪、泥盆纪、石炭纪、早二叠世演化过程^[13-14, 92-94]^②。俯冲增生杂岩中具有洋中脊、洋岛、洋内弧地球化学属性的岩浆岩岩块大量保存^[13-14, 92-94]^②,表明寒武纪芙蓉世一早二叠世洋盆内不断发生洋中脊扩张、洋内俯冲和地幔热柱活动,并陆续形成新的洋壳。对接带南侧辽西、赤峰-通辽、四平-磐石一带保存有志留纪、泥盆纪、石炭纪、早二叠世岩浆弧和弧后盆地,揭示了洋盆于志留纪一早二叠世南向俯冲特征^{①②}。结合带北侧乌兰浩特、哈尔滨-牡丹江一带保存有奥陶纪、志留纪、泥盆纪、石炭纪、早二叠世岩浆弧和弧后盆地,揭示了洋盆于奥陶纪一早二叠世北向俯冲特征^{①②}。综上所述,古亚洲洋盆在西拉木伦—长春—延吉一线由早古生代—晚古生代分别向南北两侧陆缘作双向俯冲增生运动。对接带内两侧发育大量的早二叠世岩浆弧、弧前盆地、弧间盆地和弧后盆地建造,说明早二叠世洋-陆俯冲作用强烈。俯冲增生杂岩和弧-盆系被中二叠世残余盆地覆盖,暗示洋壳没有完全消减在两侧陆缘之下,于中二叠世陆续演化成残余洋盆,并在晚二叠世一早三叠世转变为周缘前陆盆地,揭示中二叠世晚期洋盆俯冲消减结束,晚二叠世残余洋盆遭受挤压转化成前陆盆地,接受海相-陆相盆地沉积。对接带内发育较多的早一中三叠世(后)碰撞花岗岩(252~230 Ma)^[91],与晚二叠世一早三叠世前陆盆地共同记录了古亚洲洋闭合后兴-蒙造山带(松嫩-张广才岭地块)和华北板块北缘造山带(白乃庙岛弧)碰撞对接过程。晚三叠世后造

山岩浆岩(230~215 Ma)就位^[91],标志西拉木伦-长春-延吉对接带进入板内演化阶段。

3.2.2 古亚洲洋闭合阶段成矿作用

西拉木伦-长春-延吉对接带及两侧发育大量的三叠纪岩浆热液型(斑岩型、夕卡岩型、接触交代型)多金属矿产,如小井子铅锌矿、敖包山铜铅锌矿、小营子铅锌银矿、小东沟钼矿、明干山铜矿、长岭山铅锌矿、瓦房店华铜矿、错草沟小木古峪钨矿、集安市正岔铅锌矿、红旗岭铜镍矿、漂河川铜镍矿、安图刘生店钼矿、龙百里坪银矿、靖宇天合兴铜钼矿、东宁九佛沟铅锌硫铁矿等,成矿年龄介于250~220 Ma^[95],与古亚洲洋闭合后兴-蒙造山带和华北板块北缘造山带碰撞-后碰撞-后造山阶段岩浆活动同步。强烈的碰撞-后碰撞-后造山构造运动促使深部巨大的热能和流体上涌,与早期弧-盆系等含矿围岩交代并发生强烈成矿作用。碰撞-后碰撞-后造山岩浆岩与弧-盆系接触部位和伸展背景下的碱性岩、基性-超基性岩体是寻找多金属矿的有利地区。

3.3 华北板块北缘增生造山带

3.3.1 古亚洲洋南向俯冲过程

华北板块北缘造山带东段发育一系列古生代弧-盆系,指示古亚洲洋南向俯冲特征^[91-93, 96-99]。目前识别出早古生代、晚古生代2期岩浆弧。西拉木伦-长春-延吉对接带南侧保存的志留纪、泥盆纪、石炭纪、早二叠世岩浆弧和弧后盆地记录了古亚洲洋南向俯冲增生过程。在赤峰-通辽一带保存有志留纪罗德洛世一早二叠世晒乌苏组、下石碑组、前坤头沟组、白家店组、家道沟组、酒局子组、三面井组弧后盆地沉积建造和早泥盆世一早二叠世八当山组、朝吐沟组、青龙山组、乌达哈达火山岩、额里图组等岛弧火山岩建造,其间伴生有早石炭世—中二叠世(354~269 Ma)闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩等岛弧钙碱性侵入岩^{①②},揭示了古亚洲洋在西拉木伦一带志留纪罗德洛世一早二叠世南向俯冲作用。四平-磐石一带保存有志留纪兰多维列世一早二叠世桃山组、石缝组、椅山组、张家屯组、二道沟组、王家街组、黄顶子组、鹿圈屯组、磨盘山组、石嘴子组、照北山组弧后盆地沉积建造和志留纪兰多维列世一早二叠世弯月组、放牛沟

①中国地质调查局沈阳地质调查中心. 东北地区数据更新及地质编图项目报告. 2023.

②中国地质调查局沈阳地质调查中心. 东北地区基础地质图件更新课题报告. 2022.

火山岩、盘岭岩组、余富屯组、窝瓜地组、佟家屯组岛弧火山岩建造,在老陵山一带发育有 445~419 Ma 钙碱性-高钾钙碱性英云闪长岩、花岗闪长岩等岛弧侵入岩^[92-93, 96-98],揭示了古亚洲在长春-延吉一带志留纪兰多维列世一早二叠世南向俯冲作用.东、西两段弧-盆系的物质组成和形成时间基本可以对比,均记录了志留纪罗德洛世一早二叠世南向俯冲作用.部分早一中泥盆世岩浆岩(410~403 Ma)可能反映了早古生代弧-陆碰撞后伸展环境^[92];辽宁法库地区高镁安山岩(370 Ma)、辉长岩(350 Ma)具有富集的洋中脊玄武岩和板块内玄武岩地球化学特征^[93],揭示了晚泥盆世一早石炭世弧后洋盆或洋内俯冲作用的发生;在西拉木伦-长春-延吉对接带南侧发育的同碰撞侵入岩(252~242 Ma)-后碰撞侵入岩(240~230 Ma)^[91, 98-99],揭示了古亚洲洋板片俯冲、洋盆闭合、弧-陆碰撞过程.

3.3.2 古亚洲洋南向俯冲过程的成矿作用

古亚洲洋南向俯冲增生过程形成了众多的岩浆热液型、接触交代型矿床,如伊通放牛沟铅锌多金属矿床,永吉县头道川金矿,东辽县弯月金矿、各力各金矿,磐石市石咀铜矿、哈拉火烧铁矿、伊河沟铁矿等,成矿时代集中在晚古生代,与石炭纪一二叠纪岛弧岩浆活动关系密切.岛弧是洋-陆转化的直接标志,洋-陆转化阶段是地质背景转换、岩浆活动、壳幔相互作用最频繁时期,提供了大规模成矿的最佳空间和成矿物质.增生型造山带储存着大量流体,蕴藏有众多大型、超大型铜、金、多金属矿床.弧后(间)盆地沉积的砂质板岩、(变质)粉砂岩,其物理性质具有较高的脆性,受力后易破碎,裂隙发育,又富含孔隙.这些裂隙和孔隙发育的岩石既有利于矿液的渗透,又为矿液的沉淀提供必要的空间.弧-盆系岩石含水性高,有利于热液矿床运移和富集^[100].因此,岛弧与弧后(间)盆地接触部位是寻找岩浆热液型、接触交代型矿床的有利部位.

4 东北地区中生代构造演化与成矿作用

东北地区中-新生代进入蒙古-鄂霍次克洋板块的南向俯冲和古太平洋板块的西向俯冲所影响的活动大陆边缘演化阶段.板块的俯冲作用诱发了强烈的火

山喷发和岩浆侵入活动,改造了先期克拉通和造山带,前中生代地质体多被肢解成大小不一的残块保留在中生代岩浆岩中.这一时期形成了巨量的岩浆建造、含煤-油气沉积建造和丰富的金及多金属矿产资源;地层、岩石和构造的时空分布具有明显规律性;构造主体呈现明显的盆-岭相间结构,很好地揭示了蒙古-鄂霍次克洋、古太平洋板块对东北亚地区的构造影响.笔者等在前人研究成果基础上,通过东北地区 1:100 万、1:200 万系列地质编图,梳理了东北地区中-新生代地层、岩石的时空分布规律,对蒙古-鄂霍次克洋、古太平洋板块对东北亚地区影响范围和时限进行了探索.

4.1 蒙古-鄂霍次克洋南(东)向俯冲与东北亚活动陆缘演化

4.1.1 蒙古-鄂霍次克洋南(东)向俯冲与陆缘弧演化

中国东北地区尚没有发现与蒙古-鄂霍次克洋南向俯冲有关的洋壳遗迹,但发育大量的北东向、北东东向展布的中生代钙碱性火成岩带和斑岩型成矿作用,揭示了蒙古-鄂霍茨克洋中生代存在向南俯冲作用的存在^[95, 101-102].与蒙古-鄂霍次克俯冲带时空关联密切的地质建造主要分布在辽西-大兴安岭-小兴安岭西北部地区^{①②},总体构造线以北东-北东东向展布为主(图4),与蒙古-鄂霍次克构造带平行.演化时间从早三叠世一早白垩世早期.地质建造主要有钙碱性火山岩、侵入岩、断陷含煤盆地沉积、前陆盆地沉积和后造山火成岩,具有陆缘弧、弧后(陆内)伸展和碰撞构造属性,揭示了蒙古-鄂霍次克洋板块南向俯冲-弧-陆碰撞-陆内伸展的构造演化过程.

三叠纪地质记录主要有 250~200 Ma 侵入岩(辉长岩、闪长岩、石英闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩)、早三叠世木哈尔中酸性火山岩(250~247 Ma)、早-中三叠世风水山安山岩(251、243 Ma)、晚三叠世哈达陶勒盖组-柴河组中基性火山岩(237~201 Ma)、晚三叠世老虎沟组-羊草沟组断陷含煤盆地沉积(227~208 Ma)^{①②}.由北向南依次可划分 4 条岩浆岩带:新巴尔虎右旗-漠河岩浆岩带、呼伦贝尔-塔河侵入岩带、阿尔山-扎兰屯岩浆岩带、大石寨-扎赉特旗岩浆岩带.岩浆岩的地球化学显示

①中国地质调查局沈阳地质调查中心.东北地区数据更新及地质编图项目报告.2023.

②中国地质调查局沈阳地质调查中心.东北地区基础地质图件更新课题报告.2022.

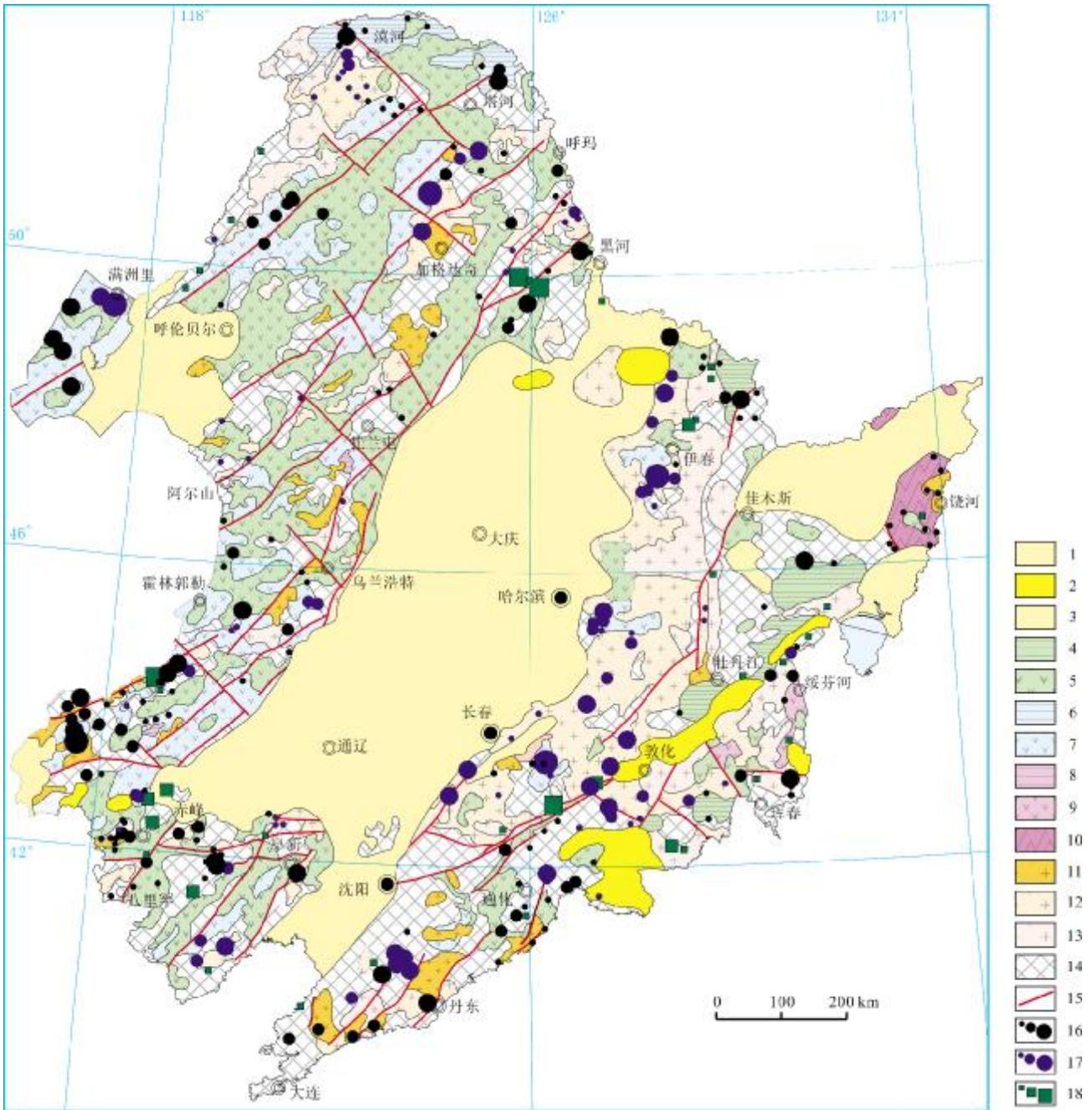


图4 研究区中-新生代地质构造及矿产分布图

Fig. 4 Meso-Cenozoic geological structures and mineral distribution in the study area

1—新生代盆地 (Cenozoic basin); 2—新生代火山岩 (Cenozoic volcanic rock); 3—晚白垩世-全新世沉积盆地 (Late Cretaceous-Holocene sedimentary basin); 4—白垩纪沉积盆地 (Cretaceous sedimentary basin); 5—白垩纪火山岩 (Cretaceous volcanic rock); 6—侏罗纪沉积盆地 (Jurassic sedimentary basin); 7—侏罗纪火山盆地 (Jurassic volcanic basin); 8—三叠纪沉积盆地 (Triassic sedimentary basin); 9—三叠纪火山岩 (Triassic volcanic rock); 10—侏罗纪增生杂岩 (Jurassic accretionary complex); 11—白垩纪侵入岩 (Cretaceous intrusive rock); 12—侏罗纪侵入岩 (Jurassic intrusive rock); 13—三叠纪侵入岩 (Triassic intrusive rock); 14—前中生代地质体 (pre-Mesozoic geological body); 15—断裂 (fault); 16—白垩纪小/中/大型矿床 (Cretaceous small/medium/large deposit); 17—侏罗纪小/中/大型矿床 (Jurassic small/medium/large deposit); 18—三叠纪小/中/大型矿床 (Triassic small/medium/large deposit)

(高钾)钙碱性岩浆弧属性^[103-104]①,且具有由北向南岩浆作用逐渐减弱和时代变新特征,暗示三叠纪蒙古-

鄂霍次克洋板块南向俯冲到大石寨-扎赉特旗一带,辽西地区三叠世老虎沟组-羊草沟组断陷盆地沉积,

①中国地质调查局沈阳地质调查中心. 松辽盆地西缘扎赉特-巴林左旗区域地质调查项目成果报告. 2023.

从形成时间和空间分布上响应了蒙古-鄂霍次克洋板块南向俯冲作用引发的弧后或陆内伸展背景。

侏罗纪地质建造大量发育,且分布广泛,从额尔古纳到辽西地区均有出露,总体呈北东向展布,表明蒙古-鄂霍次克洋板块南向俯冲作用进入高峰阶段。主要地质记录有 200~145 Ma 辉长岩、闪长岩、石英闪长岩、石英二长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、正(碱)长花岗岩,早侏罗世(200~190 Ma)战备村组酸性火山岩、兴隆沟组中基性火山岩,早侏罗世(190~174 Ma)红旗组、北票组含煤盆地沉积,中侏罗世(172~166 Ma)新民组、万宝组、七林河组、海房沟组含煤盆地沉积;中侏罗世(166~163 Ma)塔木兰沟组中基性火山岩,晚侏罗世(163~145 Ma)满克头鄂博组酸性火山岩、玛尼吐组中性火山岩、髻髻山组中性火山岩,晚侏罗世漠河残余盆地沉积^{①②}。

早侏罗世岩浆岩主要为钙碱性-高钾钙碱性-钾玄岩系列,显示与俯冲有关的活动陆缘构造背景。部分岩石具有富碱岩石特征,且伴生断陷盆地沉积和碱性花岗岩、双峰式火山岩,表明俯冲背景下局部存在伸展作用。早侏罗世额尔古纳地区发育大量闪长岩、石英闪长岩、石英二长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩和早侏罗世战备村组酸性火山岩等,辽西地区也同时发育有石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩和早侏罗世兴隆沟组中基性火山岩等弧岩浆岩,指示早侏罗世蒙古-鄂霍次克洋板块南向俯冲作用影响到辽西地区,其间出现小规模断陷含煤盆地沉积和碱性花岗岩侵位,表明局部存在弧间或弧后伸展作用。

中侏罗世地质建造以塔木兰沟组中基性火山岩和新民组、万宝组、七林河组、海房沟组含煤盆地沉积为主,伴生有弧属性的侵入岩(闪长岩、石英闪长岩、石英二长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩等)和指示伸展构造背景的岩浆岩(正长花岗岩、碱性-碱长花岗岩等)等,总体显示俯冲背景下的陆缘弧、弧间或弧后伸展特征^[105]^{①②}。弧岩浆岩主要发育在北部的额尔古纳地区和南部辽西地区,表明俯冲作用影响到辽西地区,代表伸展背景的基性火山岩、碱性岩浆岩和断陷盆地集中分布于西拉木伦河-额尔古纳地区,相当于南、北两个陆缘弧的弧间位置,暗示蒙古-鄂霍次克洋板

块南向俯冲作用在大兴安岭中段诱发了较强烈的弧间伸展作用,而辽西地区的海房沟组含煤建造也可能反映了弧后伸展作用的存在。晚侏罗世地质建造(163~145 Ma)极为发育,遍布大兴安岭及辽西地区,火山建造以满克头鄂博组、玛尼吐组、髻髻山组中性-酸性钙碱性弧火山岩为主,伴生有大量的石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩等弧侵入岩和少量伸展体制下的正长花岗岩、碱长花岗岩,揭示了蒙古-鄂霍次克洋板块持续南向俯冲作用。弧岩浆岩和伸展背景的岩浆岩相伴产出,说明俯冲背景下存在局部伸展(弧间或弧后环境)。大兴安岭北部的额尔古纳地区在晚侏罗世受到蒙古-鄂霍次克洋板块南向强烈的俯冲挤压作用,地块基底和先期陆缘弧抬升,高比降的弧前位置形成了漠河残余盆地^[24],接受了晚侏罗世绣峰组、二十二站组、漠河组沉积^③。

早白垩世贝里阿斯期(145~140 Ma),东北地区地质记录较少,岩浆岩只有极少量产出,表明岩浆活动进入宁静期,区域上形成了遍布东北地区的侏罗系和白垩系区域不整合面。在漠河盆地、大兴安岭、辽西地区不整合面之上沉积有类磨拉石建造的开库康组、土城子组和木瑞组,空间上呈北东及北东东向展布,与蒙古-鄂霍茨克构造带平行。笔者等通过对漠河盆地开库康组及下伏不整合面时限的研究,揭示构造不整合面形成于 145~137 Ma 期间^[106]。这一时期与早白垩世早期蒙古-鄂霍次克洋最终关闭^[107]的时间吻合,揭示了蒙古-鄂霍次克洋关闭后两侧弧-陆碰撞事件的发生。在碰撞挤压背景下,漠河地区早期伸展盆地(晚侏罗世弧前盆地)逐渐转化为挤压山间盆地(早白垩世早期前陆盆地),接受了贝里阿斯期开库康组类磨拉石沉积;大兴安岭中部地区形成多处山间盆地,沉积了木瑞组;辽西地区形成有较大规模的山间盆地,沉积了土城子组。该套类磨拉石建造是蒙古-鄂霍次克构造域由碰撞向造山后伸展转换的主要标志。

早白垩世早期(140~130 Ma)地质建造仅在大兴安岭地区发育,松辽盆地以东普遍缺失该段时间地质记录,说明这一时段古太平洋板块俯冲作用没有影响到大兴安岭地区。大兴安岭地区地质建造主要由白音高老组、梅勒图组、张家口组和花岗闪长岩、二长花岗

①中国地质调查局沈阳地质调查中心. 东北地区数据更新及地质编图项目报告. 2023.

②中国地质调查局沈阳地质调查中心. 东北地区基础地质图件更新课题报告. 2022.

岩、正长花岗岩等侵入岩组成。火山岩呈不整合覆盖在早白垩世贝里阿斯期类磨拉石沉积之上,具有双峰式和碱性火山岩特征,显示伸展构造背景^[101]。侵入岩以A型花岗岩为主,反映了伸展构造背景。岩浆岩总体呈北东向展布,与蒙古-鄂霍次克构造带平行,响应了蒙古-鄂霍次克构造带碰撞后伸展构造背景^[101]。130 Ma之后被北北东向早白垩世火山岩(130~100 Ma)不整合覆盖,不整合面之上的北北东向130~100 Ma火山岩带与200~130 Ma北东向火山岩带在空间上形成明显的交切关系,说明东北地区130 Ma左右是蒙古-鄂霍次克洋、古太平洋构造域转换阶段。

4.1.2 蒙古-鄂霍次克洋板块俯冲过程成矿作用

蒙古-鄂霍次克洋构造体系在东北地区形成了大量岩浆型矿产,成矿时间240~130 Ma,主要矿床类型有斑岩型Cu-Mo和Mo多金属矿床、浅成低温热液型Au床、中低温热液脉型Pb-Zn-Ag矿床和热液脉型Ag多金属矿床,主要形成于陆缘弧、蒙古-鄂霍次克洋闭合后的后碰撞-后造山伸展背景^{[108]①}。

东北地区三叠纪矿产较为发育,北东向展布的成矿区带主要分布在赤峰、大兴安岭南段乌兰坝、大兴安岭北段额尔古纳和小兴安岭黑河地区,矿床的成矿时间和成因与蒙古-鄂霍次克洋板块南向俯冲陆缘弧形成时代对应,揭示了其形成于蒙古-鄂霍次克洋南向俯冲的陆缘弧成矿背景。与岛弧岩浆作用有关的矿产主要有:额尔古纳一带八大关斑岩型Cu-Mo矿(229 Ma)、八八一斑岩型Cu-Mo矿(234 Ma)、太平川斑岩型Mo-Cu矿(202 Ma),大兴安岭南段白音诺尔夕卡岩型Pb-Zn矿(245 Ma)、查干敖包夕卡岩型Pb-Zn矿(237 Ma)、必鲁甘干斑岩型Mo矿(238 Ma)、劳家沟斑岩型Mo矿(235 Ma)等矿床,辽西地区的撒岱沟门斑岩型Mo矿(237 Ma)、库里吐斑岩型Mo矿(236 Ma)等^{[108]①},黑河地区二道坎浅成低温热液型Ag矿(232 Ma)。矿床多产于侵入古生代地层的岩体和中生代岩浆岩与古生代地层接触部位,说明古生代地层与成矿作用关系密切,可能为中生代成矿提供了矿源、流体及容矿构造,弧岩浆是主要的热动力源。区域上矿床和成矿地质建造主要沿北东向展布,北东向断裂是主要控矿构造,而北西向断裂是主要的容矿构造。

侏罗纪成矿作用较三叠纪明显增强,北东向展布

的成矿区带与蒙古-鄂霍次克洋侏罗纪南向强烈俯冲作用背景吻合。北东向成矿区带主要分布在大兴安岭和辽西地区。如大兴安岭地区产出的乌奴格吐山斑岩型Cu-Mo矿床(181 Ma)、索纳嘎辉斑岩型Mo矿(167 Ma)、迪岩斑岩型Mo矿(160 Ma)、迪彦钦阿木斑岩型Mo矿(156 Ma)、岔路口斑岩型Mo矿(147 Ma)、三矿沟夕卡岩型Cu矿床(175 Ma)、小多宝山夕卡岩型Cu矿床(171 Ma)、二道河子中低温热液型Pb-Zn-Ag矿(164 Ma)、比利亚谷中低温热液型Pb-Zn-Ag矿(159 Ma)、孟恩陶勒盖中低温热液型Pb-Zn-Ag矿(182 Ma)、红花岗基高温热液脉型W-Mo矿(177 Ma)、布敦化斑岩型-热液脉型Cu矿(150 Ma)、喀什吐Cu-Mo矿(147 Ma),辽西地区鸡冠山Mo矿(151 Ma)、肖家营子Mo矿(166 Ma)、杨家杖子Mo矿(187~191 Ma)、兰家沟Mo矿(189 Ma)等^{[108]①}。斑岩型及中高温热液型矿床主要与弧岩浆作用有关,早、中、晚侏罗世均有矿床形成,进一步佐证蒙古-鄂霍次克洋在侏罗纪南向俯冲具有连续性,部分中低温热液型矿床及煤矿形成于弧间或弧后的伸展背景。

白垩纪是东北地区矿床产出数量最多的时期,大兴安岭南段发育众多与岩浆活动有关的多金属矿产。这些矿床的形成年龄集中在140~130 Ma之间,响应了蒙古-鄂霍次克构造带碰撞后伸展构造背景,揭示蒙古-鄂霍次克构造带碰撞后伸展作用源自深部巨量的热能和流体,促进了区域岩浆成矿作用。而松辽盆地以东地区130~140 Ma的矿产极少,进一步证实了蒙古-鄂霍次克构造域的影响范围主要在大兴安岭南段一带。在大兴安岭中北段产出矿产主要有:漠河盆地砂宝斯造山型Au矿床(130 Ma)、虎拉林浅成低温热液型Au矿(136 Ma)、查干布拉根浅成低温热液型Ag多金属矿(138 Ma)、甲乌拉浅成低温热液型Ag多金属矿(143 Ma)、额仁陶勒盖热液型Ag多金属矿(138 Ma)、东珺热液型Ag多金属矿(130 Ma)、新帐房斑岩型Mo-Cu矿(134 Ma)、宜里斑岩型Mo-Cu矿(131 Ma)、下吉宝沟斑岩型金矿(137 Ma)^{①[108]}。在大兴安岭南段产出矿产主要有:乌日尼图斑岩型Mo-W矿(139 Ma)、乌兰德勒斑岩型Mo矿(134 Ma)、乌花敖包斑岩型Mo矿(139 Ma)、半砬山斑岩型Mo矿(136 Ma)、小东沟斑岩型Mo矿(136 Ma)、海苏沟斑岩

①中国地质科学院地质研究所. 北方东部复合造山成矿系统深部结构与成矿过程项目报告. 2022.

型 Mo 矿(136 Ma)、台布呆斑岩型 Cu 矿(137 Ma)、敖脑达坝斑岩型 Cu-Ag-Sn (138 Ma), 大井热液型 Pb-Zn-Ag-Cu-Sn 矿(133 Ma)、边家大院热液型 Pb-Zn-Ag 矿(143、140 Ma)、敖包吐热液型 Pb-Ag 多金属矿(140 Ma)、扎木钦热液型 Pb-Zn 矿(138 Ma)、花敖包特热液型 Ag-Pb-Zn 矿(136 Ma)、拜仁达坝热液型 Ag-Pb-Zn 矿(135 Ma)、维拉斯托斑岩型-热液型 Sn-Ag-Pb-Zn 矿(133~135 Ma)、莲花山热液型 Cu 矿床(139 Ma)、别鲁乌图热液型 Cu 多金属矿(134 Ma)、闹牛山斑岩型-热液型 Cu 矿(134 Ma)、安乐热液型 Cu 多金属矿床(133 Ma)、沙麦高温岩浆热液型 W(Sn)矿(137 Ma)、查木罕高温岩浆热液型 W(Sn)矿(139 Ma)、白音查干高温岩浆热液型 Sn 矿(141 Ma)、宝盖沟高温岩浆热液型 Sn 矿(139 Ma)、黄岗夕卡岩型 Fe-Sn 矿、朝不楞夕卡岩型 Fe-Zn-Bi 矿、浩布高夕卡岩型 Fe-Zn-Cu 矿(135、141、142 Ma)、羊场石英脉型 Mo 矿床(139 Ma)、岗子云英岩型 Mo 矿(139 Ma)^[108]①。上述矿床以岩浆型 W、Sn、Mo、Cu、Pb、Zn、Ag 等多金属矿为主, Au 矿仅产于蒙古-鄂霍次克构造带附近的漠河盆地北部(造山型 Au 矿)。其中高温岩浆热液型、斑岩型、夕卡岩型矿床的形成主要与 140~130 Ma 碰撞后伸展构造背景的岩浆(A 型花岗岩)侵入作用有关, 浅成低温热液型、石英脉型、云英岩型矿产主要与同期火山作用有关。

4.2 古太平洋(北)西向俯冲与东北亚活动陆缘演化

4.2.1 古太平洋(北)西向俯冲过程陆缘弧演化

东北亚大陆边缘中-新生代构造演化主要受控于古太平洋-太平洋板块俯冲作用^[109-110]。目前西太平洋地区发现的最古老残留洋壳 Ar-Ar 年龄为 167 Ma^[111], 从海底磁条带的年龄分布以及对太平洋扩张速率的估算, 推测古太平洋板块(伊泽奈崎板块)形成时间为 190 Ma 左右^[112]。在东北亚陆缘保存有较为完整的侏罗纪饶河增生杂岩, 作为古太平洋板块西向俯冲的主要标志, 其构造就位揭示了古太平洋板块向欧亚大陆俯冲作用的存在^[19]。饶河增生杂岩由晚三叠世-中侏罗世地幔柱型蛇绿岩-超镁铁质岩-辉长岩-基性火山岩岩块、晚三叠世-中侏罗世洋中脊型蛇绿岩-玄武

岩岩块、中三叠世-中侏罗世深海-半深海硅质岩岩块、早-晚侏罗世海沟-斜坡盆地浊积岩基质组成^[21]②。饶河地区燧石岩、硅质页岩、硅泥质岩中产出中三叠世-中侏罗世放射虫等化石, 辉长岩岩块的年龄在 156~228 Ma 之间, 西侧火山弧(初始弧)年龄在 174~182 Ma 之间^[20-21], 指示完达山洋盆的西向俯冲作用发生在早侏罗世-晚侏罗世。张广才岭一带发育有大规模早侏罗世岩浆弧, 揭示了早中生代古太平洋的西向俯冲作用^③。饶河-跃进山一带发育有早白垩世后碰撞花岗岩(114~126 Ma), 限定了饶河杂岩的最终就位时代为 133~126 Ma^[20]。

从地质建造上分析, 与古太平洋构造线平行的北北东向和近南北向展布的火成岩带和盆地群主要分布于大兴安岭东坡、松辽盆地以东及辽东半岛一带, 表明古太平洋板块(北)西向俯冲作用主要影响到大兴安岭东坡一带^[19, 95, 101]。太平洋构造域的岩浆构造事件、沉积事件主要集中在早-中侏罗世(200~163 Ma)、早白垩世晚期-晚白垩世晚期(130~66 Ma)2 个阶段。

早-中侏罗世地质建造主要分布在松辽盆地以东地区, 其中在小兴安岭-张广才岭-长白山南部和密山一带保存有北北东向展布的早侏罗世早期山间盆地(200~190 Ma), 沉积有太安屯组、玉兴屯组、北庙组和大秃山组火山-沉积岩系, 不整合于前侏罗纪地质体之上, 是古亚洲构造域向古太平洋构造域转换的主要沉积标志, 其内火山岩以中性-中酸性钙碱性火山岩为主, 沉积岩以粗碎屑的砾岩、砂岩为主, 富含火山灰。同期侵入岩主要有花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩等, 呈近南北向分布在小兴安岭-张广才岭-长白山东部地区, 总体为一套钙碱性弧岩浆岩。该时段火成岩保存较少, 说明古太平洋板块西向初始俯冲作用偏弱。小兴安岭-张广才岭-长白山南部及饶河地区发育有近南北向展布的早侏罗世晚期(190~175 Ma)中性-中酸性钙碱性火山岩(神树组、二浪河组、南楼山组、东方红火山岩), 伴生有大量的同期钙碱性弧岩浆岩(花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩), 揭示古太平洋板块在早侏罗世晚期北西向俯冲作用逐渐增强。岩浆弧的西侧辽东地区发育一系列断陷盆地, 沉积了含煤岩

①中国地质科学院地质研究所. 北方东部复合造山成矿系统深部结构与成矿过程项目报告. 2022.

②中国地质调查局沈阳地质调查中心. 东北地区数据更新及地质编图项目报告. 2023.

③中国地质调查局沈阳地质调查中心. 东北地区基础地质图件更新课题报告. 2022.

系(皆古台组、义和组、长梁子组、瓦房店组),揭示了弧后伸展断陷沉积作用的发生. 中侏罗世岩浆岩分布较少,小兴安岭-张广才岭-长白山地区零星产出有钙碱性弧岩浆岩(花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩),在岩浆弧的西侧辽东地区规模较大的断陷盆地内沉积有含煤岩系(转山子组、大堡组、三个岭组、太阳岭组、小东沟组),显示了弧后伸展作用存在,表明古太平洋板块在中侏罗世北西向俯冲作用逐渐减弱.

松辽盆地以东地区晚侏罗世一早白垩世早期岩浆作用和沉积建造的普遍缺失,反映了古太平洋板块小角度斜向俯冲和东北亚陆缘的走滑构造属性^[109-110]. 在东北亚陆缘(西至大兴安岭东坡地区)早白垩世中期(113~130 Ma)的岩浆岩呈北北东、近南北向带状平行于陆缘广泛分布,东部陆缘一带显示钙碱性火成岩组合,西部陆内地区具有双峰式火山岩组合特征,它们共同揭示了古太平洋板块在欧亚大陆下俯冲作用的发生^[109-110],并具有自陆内向陆缘岩浆作用时代变新的特征(130—110—90 Ma). 岩浆作用的空间范围逐渐向东收缩,揭示了东亚陆缘不断增生和古太平洋俯冲板片后撤过程的构造演化特征^[19]. 东北地区发育的大量白垩纪火山-沉积建造和 113~130 Ma 碱性及双峰式火山岩,印证了古太平洋板片后撤式俯冲导致的陆缘伸展背景^[19].

早白垩世巴雷姆期(130~125 Ma)东北地区除小兴安岭-张广才岭地区遭受强烈剥蚀,保存的火山岩稀少外,大部分地区均有火山岩出露,大兴安岭地区最为发育. 从大兴安岭—松辽盆地—完达山地区依次产出有龙江组、光华组、义县组、桂云花组、小岭组、果松组、屯田营组、火石岭组、滴道组、裴德组、南大塔山组. 各组的岩石组合与年代均可对比,总体以钙碱性、中性、中酸性、酸性火山岩为主. 靠近西部陆内地区发育双峰式火山岩(碱性流纹岩、玄武岩),东部以中性、中酸性火山岩为主,伴有钙碱性花岗岩(花岗闪长岩、二长花岗岩)和含煤盆地沉积,响应了东部古太平洋板块西向强烈俯冲作用. 阿普特早期(125~116 Ma),东北地区岩浆活动进入相对宁静期,从大兴安岭—完达山地区普遍发育含煤盆地沉积(九峰山组、九佛堂组、沙河子组、建兴组、德仁组、久大组、城子河组、穆棱组、鹰嘴砬子组等),完达山地区保存有东安镇组、大架山组残余海盆沉积,火山岩和侵入岩零星分布在盆地内,说

明该阶段古太平洋板块西向俯冲作用减弱,区域上处于俯冲后的伸展背景. 阿普特晚期(116~113 Ma),东北地区岩浆作用再次活跃,但岩浆岩出露规模较巴雷姆期明显减小,大兴安岭地区发育甘河组、孤山镇组双峰式火山岩,向东依次渐变为钙碱性火山岩(孤山组、营城组、板子房组、宁远村组、安民组、东山组、泉水村组、皮克山组),早期盆地中继续沉积含煤建造(沙海组、石人组、聂尔库组、亨通山组、珍宝岛组),同时有少量钙碱性-碱性岩浆岩侵入,表明该阶段古太平洋板块发生板片后撤. 阿尔布期(113~106 Ma),岩浆活动再次进入宁静期,仅在大兴安岭、辽西、吉中地区早期盆地内发育含煤沉积,中东部普遍缺失该阶段地质记录,说明古太平洋板块西向俯冲作用不断减弱;阿尔布晚期(106~100 Ma),岩浆活动再次出现,但火山岩只零星分布在辽西(大兴庄组)、小兴安岭(福民河组、美丰组双峰式火山岩)、吉林中部地区(金家屯组、三棵榆树组)、佳木斯地区(松木河组),火山岩由西向东逐渐由碱性(双峰式)向钙碱性递变,早期断陷盆地之上出现平行不整合,接受拗陷期盆地沉积(登楼库组、猴石沟组、大砬子组),大兴安岭和长白山地区处于隆升剥蚀状态,缺失地质记录,表明古太平洋板块俯冲后撤作用加速. 总体来看,东北地区早白垩世巴雷姆期—阿尔布期,岩浆作用与沉积作用交替进行,岩浆活动不断向东迁移,揭示古太平洋板块脉动式后撤俯冲特征.

晚白垩世,东北地区岩浆活动整体进入宁静期,除松辽盆地接受拗陷盆地含油沉积(泉头组—明水组),其余小型盆地逐渐被晚白垩世早期类磨拉石建造充填(孙家湾组、海浪组、龙井组、淘淇河组、小南沟组、大峪组),晚白垩世晚期大部分地区普遍缺失岩浆作用和沉积建造,响应了古太平洋板块小角度斜向俯冲和东北亚陆缘的走滑构造属性. 白垩纪—古近纪早期东亚增生杂岩与陆缘白垩纪—古近纪弧岩浆作用一起,共同揭示了白垩纪—古近纪俯冲作用的存在;而白垩纪—古近纪岩浆作用范围向海沟方向的收缩,揭示了古太平洋板块西向俯冲以及俯冲板片后撤过程的发生^[19]. 东北地区的中生代大型盆地主要形成于早白垩世—始新世(除漠河盆地外),与这一期的岩浆岩一起共同受控于古太平洋板块的西向俯冲作用. 早白垩世大规模岩浆带、沉积盆地、北东走向大型左行走滑断裂的形成,构成了东北地区盆-岭体系的雏型,而宏伟壮观的

盆-山地貌主要形成始新世以后^[24]。新生代以来,继承和改造了中生代的构造格架,数次受太平洋板块北西向俯冲,北东向断裂活化,多期次火山喷发,断块差异性升降,使已形成的大、小兴安岭继续抬升,松辽盆地、三江盆等继续沉降。这种大面积的伸展运动塑造了现今海拉尔盆地、二连盆地、大兴安岭、松辽盆地、小兴安岭、三江盆地、完达山等盆-岭地貌格局。

4.2.2 古太平洋板块俯冲过程的陆缘成矿作用

古太平洋构造演化阶段形成有大量的矿产资源,除煤炭、油气等资源形成于各断凹盆地沉积作用外,与岩浆作用有关的金及多金属矿产也十分丰富。主要矿种是金,其次是钨和钼,矿床类型主要有斑岩型 Mo、W、Cu 矿床、夕卡岩型矿床和浅成低温热液型 Au 矿床。成矿区带主要呈近南北向展布,成矿作用发生于 200~100 Ma,矿床形成于古太平洋板块(北)西向俯冲有关的活动大陆边缘环境。

侏罗纪成矿作用强烈,发育在松辽盆地以东地区的矿床呈近南北向空间展布。以岛弧斑岩型 Mo-Cu 矿最为发育,主要有夹皮沟 Mo 矿(188 Ma)、大石河 Mo 矿(186 Ma)、霍吉河 Mo 矿(181 Ma)、翠岭 Mo 矿(178 Ma)、鹿鸣 Mo 矿(177 Ma)、大黑山 Mo 矿(168 Ma)、季德屯 Mo 矿(168 Ma)、福安堡 Mo 矿(166 Ma)、长安堡 Mo 矿(166、167 Ma)、大冰湖沟 Mo 矿(192 Ma)、大石河 Mo 矿(187 Ma)、杏山 Mo 矿(167 Ma)、双山 Mo 矿(175 Ma)、刘生店 Mo 矿(169 Ma)、三岔 Mo 矿(183 Ma)、后倒木 Mo 矿(167 Ma)、石马洞 Mo 矿(169 Ma)、姚家沟 Mo 矿(168 Ma)、五道岭 Cu-Mo 矿(186 Ma)、弓棚子 Cu-Zn-Mo 矿(186 Ma)、秋皮沟 Cu 矿(184 Ma)、松江 Cu 多金属矿(184 Ma)、白岭 Cu-Zn 矿(176 Ma),其次为夕卡岩型多金属矿床,如小西林 Pb-Zn 矿(200 Ma)、大西林 Pb-Zn 矿(186 Ma)、翠宏山 Fe-Mo 矿(198 Ma)、二股 Pb-Zn 矿(182 Ma)、白石砬子白钨矿(198 Ma)、东山 Fe 多金属矿(195 Ma)、响水河 Cu-Fe 多金属矿(194 Ma)、徐老九沟 Pb-Zn 矿(181 Ma)、西山 Cu-Fe 多金属矿(176 Ma)、兰家 Au-Fe 矿(170 Ma)、六道崴子多金属矿(190~170 Ma)、白石洞 Fe 矿(165 Ma)。此外,还发育有与中深成侵入岩有关的中温热液脉型金矿床,如大安河 Au 矿(189 Ma)、山门 Ag-Au 矿(167 Ma)、粗榆 Au 矿

(169 Ma)、夹皮沟 Au 矿(170~178 Ma)、六批叶 Au 矿(173~176 Ma)、海沟 Au 矿(170 Ma)、沙金沟 Au 矿(166 Ma)、兰家 Au 矿(170 Ma)等^[108]。成矿时代集中在 195~166 Ma,响应了古太平洋板块在早一中侏罗世北西向俯冲作用。岛弧岩浆活动是斑岩型 Mo-Cu 矿、夕卡岩型多金属矿、中温热液脉型金矿的主要成矿条件。

东北地区白垩纪成矿作用爆发,分布广泛,成矿区带呈北北东及近南北向展布,以浅成低温热液型 Au 矿为主,少量中高温热液脉型 Au 矿、角砾岩型 Mo 矿、斑岩型 Mo-Cu-Au-Sn 矿、夕卡岩型 Cu-Au 矿、高温岩浆热液型稀有-稀土矿等。浅成低温热液型 Au 矿床主要有四平山 Au 矿(122 Ma)、乌拉嘎 Au 矿(114 Ma)、小西南岔 Au 矿(111 Ma)、四山林场 Au 矿(111 Ma)、金厂 Au 矿(113 Ma)、老柞山 Au 矿(109、107 Ma)、杜荒岭 Au 矿(107 Ma)、九三沟 Au 矿(106 Ma)、宝兴沟 Au 矿(125 Ma)、古利库 Au 矿(122、126 Ma)、三道湾子 Au 矿(112、122 Ma)、开门 Au 矿(108 Ma)、东安 Au 矿(105 Ma)、刺猬沟 Au 矿(103 Ma)、五凤-五星山 Au 矿(123 Ma)、石井 Au 矿(105 Ma)、代王砬子 Au 矿(114 Ma)、258 高地 Au 矿(110 Ma)、十五里桥 Au 矿(125、115 Ma)、四五牧场 Au 矿(120 Ma)、上马场 Au 矿(123 Ma)、张三沟 Au 矿(104 Ma)、闹枝沟 Au 矿(127 Ma)等;中高温热液脉型 Au 矿有瓦拉里 Au 矿(120 Ma)、黑龙沟 Au 矿(118 Ma)、老柞山 Au 矿(109 Ma);高温岩浆热液型稀有-稀土元素矿床有巴尔哲 REE-Nb-Be-Y 矿床(124 Ma);斑岩型矿床主要有金厂 Cu-Au 矿(114 Ma)、金厂沟 Cu-Mo 矿(114 Ma)、农坪 Cu-Au 矿(100 Ma)、小西南岔 Cu-Au 矿(111 Ma)、维拉斯托斑岩型 Sn 矿(126 Ma)、常发沟 Cu 矿(113 Ma)、天合兴 Cu-Mo 矿(115 Ma)、砍椽沟 Mo-Cu 矿(112 Ma)、河口林场 Sn 多金属矿床(121 Ma)等。此外,还有金场沟角砾岩型 Mo 矿(114 Ma)、跃进山夕卡岩型 Cu-Au 矿(109 Ma)、洛古河夕卡岩型多金属矿(127 Ma)等^[108]。综上所述,白垩纪内生成矿作用年龄集中在 127~100 Ma,形成于早白垩世巴雷姆晚期—阿尔布晚期古太平洋板块西向俯冲后撤阶段,板块后撤陆内及陆缘伸展背景下的碱性(双峰式火山岩)-钙碱性岩浆活动是区域成矿作用的主要条件。

①中国地质科学院地质研究所. 北方东部复合造山成矿系统深部结构与成矿过程项目报告. 2022.

5 结论

(1)在华北克拉通中划分出 2.8~3.8 Ga 垂向增生的原始陆核、2.7~2.5 Ga 古板块俯冲陆缘增生带、2.2~1.8 Ga 辽-吉结合带、新元古代—早古生代盖层等构造单元。铁、硼、菱镁矿等矿产主要形成于古板块俯冲过程, BIF 铁矿主要形成于 2.55 Ga, 硼、菱镁矿主要形成于 1.95~1.83 Ga。

(2)在兴-蒙造山带中分解出地块、被动陆缘、结合带、对接带、岩浆弧、残余盆地、碰撞-后造山岩浆岩带等构造单元;对地块间分割洋盆的洋-陆转化时间进行了界定,确认古亚洲洋最终闭合时间在晚二叠世,弧-陆碰撞时间发生在早—中三叠世。成矿作用主要形成于岛弧及古亚洲洋闭合后的伸展背景,成矿时代集中在 485~475 Ma、350~260 Ma、250~230 Ma 三个阶段。

(3)确认了蒙古-鄂霍次克构造域在东北地区影响范围,其南界至大兴安岭南段,东北界至小兴安岭西北部地区,演化时间为 250~130 Ma。南向俯冲作用主要发生在 250~145 Ma,碰撞时间发生于 145~140 Ma,碰撞后-陆内伸展时间为 140~130 Ma。主要矿产形成于岩浆弧、碰撞后陆内伸展背景,成矿时间集中在 238~202 Ma、181~147 Ma、140~130 Ma。

(4)明确了古太平洋板块俯冲时间、方向和影响范围。北西向俯冲时间在 200~163 Ma,主要影响到松辽盆地以东地区;北向俯冲时间在 163~130 Ma,东北地区处于走滑大陆边缘;西向俯冲时间为 130~66 Ma,影响到大兴安岭西坡一带,具有板块后撤式俯冲特征。斑岩型矿床、夕卡岩型多金属矿床主要形成于 195~166 Ma 陆缘弧环境、浅成低温热液型矿主要形成于板块后撤过程(127~100 Ma)陆内伸展背景。

参考文献(References):

[1]任纪舜. 新一代中国大地构造图——中国及邻区大地构造图(1:5 000 000) 附简要说明: 从全球看中国大地构造[J]. 地球学报, 2003, 24(1): 1-2.
Ren J S. The tectonic map of China and adjacent regions(1:5 000 000) with brief description: A global view[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2003, 24(1): 1-2. (in Chinese)

[2]董树文, 张岳桥, 陈宣华, 等. 晚侏罗世东亚多向汇聚构造体系的形成与变形特征[J]. 地球学报, 2008, 29(3): 306-317.
Dong S W, Zhang Y Q, Chen X H, et al. The formation and deformational

characteristics of East Asia multi-direction convergent tectonic system in Late Jurassic[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008, 29(3): 306-317.

[3]李锦铁, 张进, 杨天南, 等. 北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构造分区与构造演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(4): 584-605.
Li J Y, Zhang J, Yang T N, et al. Crustal tectonic division and evolution of the southern part of the north Asian orogenic region and its adjacent areas[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39(4): 584-605.

[4]万渝生, 颀颀强, 董春艳, 等. 华北克拉通太古宙构造热事件时代及演化[J]. 地球科学, 2020, 45(9): 3119-3160.
Wan Y S, Xie H Q, Dong C Y, et al. Timing of tectonothermal events in archean basement of the North China craton[J]. Earth Science, 2020, 45(9): 3119-3160.

[5]周红英, 刘敦一, 万渝生, 等. 辽宁鞍山地区东山杂岩带 3.3~3.1 Ga 期间的岩浆作用——锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. 地质通报, 2008, 27(12): 2122-2126.
Zhou H Y, Liu D Y, Wan Y S, et al. 3.3-3.1 Ga magmatism in the Dongshan complex, Anshan area, Liaoning, China: Evidence from SHRIMP U-Pb zircon dating[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(12): 2122-2126.

[6]王涛, 张建军, 李舫, 等. 东北亚晚古生代—中生代岩浆时空演化: 多重板块构造体制范围及叠合的鉴别证据[J]. 地学前缘, 2022, 29(2): 28-44.
Wang T, Zhang J J, Li S, et al. Distinctive spatial-temporal evolution of Late Paleozoic to Mesozoic magmatic systems in Northeast Asia: Evidences for identification of the extent and superposition of multiple plate tectonic regimes[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(2): 28-44.

[7]刘永江, 冯志强, 蒋立伟, 等. 中国东北地区蛇绿岩[J]. 岩石学报, 2019, 35(10): 3017-3047.
Liu Y J, Feng Z Q, Jiang L W, et al. Ophiolite in the eastern Central Asian Orogenic Belt, NE China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(10): 3017-3047.

[8]冯志强, 刘永江, 金巍, 等. 东北大兴安岭北段蛇绿岩的时空分布及与区域构造演化关系的研究[J]. 地学前缘, 2019, 26(2): 120-136.
Feng Z Q, Liu Y J, Jin W, et al. Spatiotemporal distribution of ophiolites in the northern Great Xing'an Range and its relationship with the geotectonic evolution of NE China[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(2): 120-136.

[9]李曙光, 汪洋. 中国东部大地幔楔形成时代和华北克拉通岩石圈减薄新机制——深部再循环碳的地球动力学效应[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(7): 809-824.
Li S G, Wang Y. Formation time of the big mantle wedge beneath eastern China and a new lithospheric thinning mechanism of the North China Craton: Geodynamic effects of deep recycled carbon[J]. Science

- China Earth Sciences, 2018, 61(7): 853–868.
- [10]朱日祥, 徐义刚. 西太平洋板块俯冲与华北克拉通破坏[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(9): 1346–1356.
- Zhu R X, Xu Y G. The subduction of the west Pacific plate and the destruction of the North China Craton [J]. Science China Earth Sciences, 2019, 62(9): 1340–1350.
- [11]徐增连, 骆满生, 杨文麟, 等. 额尔齐斯–西拉木伦对接带古生代沉积盆地演化[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2014, 39(8): 1099–1118.
- Xu Z L, Luo M S, Yang W L, et al. Paleozoic sedimentary basins evolution of Ertix-Xar Moron suture [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2014, 39(8): 1099–1118.
- [12]李益龙, 周汉文, 钟增球, 等. 华北与西伯利亚板块的对接过程: 来自西拉木伦缝合带变形花岗岩锆石 LA-ICP-MSU-Pb 年龄证据[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2009, 34(6): 931–938.
- Li Y L, Zhou H W, Zhong Z Q, et al. Collision processes of North China and Siberian plates: Evidence from LA-ICP-MS zircon U-Pb age on deformed granite in Xar Moron suture zone [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2009, 34(6): 931–938.
- [13]杨晓平, 钟辉, 杨雅军, 等. 大兴安岭地区古生代构造格架重建: 来自俯冲增生杂岩研究进展[J]. 地学前缘, 2022, 29(2): 94–114.
- Yang X P, Zhong H, Yang Y J, et al. Research progress on the subduction-accretion complex: Reconstruction of the tectonic framework of the Great Xing'an Range [J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(2): 94–114.
- [14]杨晓平, 杨雅军, 钱程, 等. 大兴安岭古生代“洋板块地质”研究进展[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2022.
- Yang X P, Yang Y J, Qian C, et al. Research progress of Paleozoic oceanic plate geology in the Great Xing'an Range [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2022. (in Chinese)
- [15]周建波, 陈卓. 北方造山带东段聚合过程及其对东北亚三大构造域时空转换的启示[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(11): 2682–2686.
- Zhou J B, Chen Z. Assembly processes in the eastern Northern Orogenic Belt and implications for the spatiotemporal transition of major tectonic domains in Northeast Asia [J]. Science China Earth Sciences, 2023, 66(11): 2648–2652.
- [16]张允平, 宋维民, 那福超, 等. 蒙古–鄂霍茨克褶皱系地质特征及其构造属性讨论[J]. 地质与资源, 2022, 31(3): 259–274, 288.
- Zhang Y P, Song W M, Na F C, et al. Geological characteristics and tectonic attribute of Mongolia-Okhotsk fold system [J]. Geology and Resources, 2022, 31(3): 259–274, 288.
- [17]许文良, 孙晨阳, 唐杰, 等. 兴蒙造山带的基底属性与构造演化过程[J]. 地球科学, 2019, 44(5): 1620–1646.
- Xu W L, Sun C Y, Tang J, et al. Basement nature and tectonic evolution of the Xing'an-Mongolian orogenic belt [J]. Earth Science, 2019, 44(5): 1620–1646.
- [18]杨雅军, 杨晓平, 江斌, 等. 大兴安岭中生代火山岩地层时空分布与蒙古–鄂霍茨克洋、古太平洋板块俯冲作用响应[J]. 地学前缘, 2022, 29(2): 115–131.
- Yang Y J, Yang X P, Jiang B, et al. Spatio-temporal distribution of Mesozoic volcanic strata in the Great Xing'an Range: Response to the subduction of the Mongol-Okhotsk Ocean and Paleo-Pacific Ocean [J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(2): 115–131.
- [19]许文良, 王旖旎, 王枫, 等. 西太平洋俯冲带的演变: 来自东北亚陆缘增生杂岩的制约[J]. 地质论评, 2022, 68(1): 1–17.
- Xu W L, Wang Y N, Wang F, et al. Evolution of western Pacific subduction zones: Constraints from accretionary complexes in NE Asian continental margin [J]. Geological Review, 2022, 68(1): 1–17.
- [20]韩伟, 周建波. 古太平洋板块俯冲? 增生时限: 饶河增生杂岩的地球化学和年代学制约[J]. 岩石学报, 2020, 36(3): 703–725.
- Han W, Zhou J B. Paleo-Pacific subduction-accretion: Geochemical and geochronology constraints from the Raohe accretionary complex, NE China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(3): 703–725.
- [21]Du B Y, Li C L, Liu F, et al. Subduction-accretion history of the Paleo-Pacific plate beneath the Eurasian continent: Evidence from the Tongjiang accretionary complex, NE China [J]. Minerals, 2023, 13(8): 1038.
- [22]杨晓平, 江斌, 杨雅军. 大兴安岭早白垩世火山岩的时空分布特征[J]. 地球科学, 2019, 44(10): 3237–3251.
- Yang X P, Jiang B, Yang Y J. Spatial-temporal distribution characteristics of Early Cretaceous volcanic rocks in Great Xing'an Range area [J]. Earth Science, 2019, 44(10): 3237–3251.
- [23]索艳慧, 李三忠, 曹现志, 等. 中国东部中生代反转构造及其记录的大洋板块俯冲过程[J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 249–267.
- Suo Y H, Li S Z, Cao X Z, et al. Mesozoic-Cenozoic inversion tectonics of East China and its implications for the subduction process of the oceanic plate [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(4): 249–267.
- [24]李锦轶, 刘建峰, 曲军峰, 等. 中国东北地区主要地质特征和地壳构造格架[J]. 岩石学报, 2019, 35(10): 2989–3016.
- Li J Y, Liu J F, Qu J F, et al. Major geological features and crustal tectonic framework of Northeast China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(10): 2989–3016.
- [25]杜兵盈, 刘飞, 刘勇, 等. 黑龙江省中东部地区二叠纪–早侏罗世洋陆演化过程及成矿动力学背景探讨[J]. 地质论评, 2022, 68(2): 431–451.
- Du B Y, Liu F, Liu Y, et al. Permian-Early Jurassic ocean-continent evolution and metallogenic dynamic setting in the central and eastern part of Heilongjiang Province [J]. Geological Review, 2022, 68(2): 431–451.
- [26]唐克东, 鞠楠, 张大权, 等. 关于古亚洲洋构造演化研究的几点思考[J]. 地质与资源, 2022, 31(3): 246–258, 330.
- Tang K D, Ju N, Zhang D Q, et al. Implication of the tectonic

- evolution of Paleo-Asian Ocean[J]. *Geology and Resources*, 2022, 31(3): 246–258, 330.
- [27] 万渝生, 董春艳, 颜炳强, 等. 华北克拉通太古宙研究若干进展[J]. *地球学报*, 2015, 36(6): 685–700.
- Wan Y S, Dong C Y, Xie H Q, et al. Some progress in the study of Archean basement of the North China Craton[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2015, 36(6): 685–700.
- [28] Wang Y F, Li X H, Jin W, et al. Eoarchean ultra-depleted mantle domains inferred from ca. 3.81 Ga Anshan trondhjemitic gneisses, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2015, 263: 88–107.
- [29] 万渝生, 董春艳, 任鹏, 等. 华北克拉通太古宙 TTG 岩石的时空分布、组成特征及形成演化: 综述[J]. *岩石学报*, 2017, 33(5): 1405–1419.
- Wan Y S, Dong C Y, Ren P, et al. Spatial and temporal distribution, compositional characteristics and formation and evolution of Archean TTG rocks in the North China Craton: Asynthesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(5): 1405–1419.
- [30] Guo R R, Li Z H, Liu S W, et al. Late Neoproterozoic geodynamic regime of the northeastern North China Craton: Constraints from metamorphosed volcanic rocks of the Anshan-Benxi greenstone belt[J]. *Precambrian Research*, 2022, 371: 106583.
- [31] 代堰铭, 张连昌, 朱明田, 等. 鞍山地区太古代 BIF 成矿作用、地壳增生及富矿成因[J]. *矿物学报*, 2013, 33(S2): 386–387.
- Dai Y P, Zhang L C, Zhu M T, et al. Mineralization, crustal growth and origin of iron rich ore in Anshan-Benxi area[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2013, 33(S2): 386–387. (in Chinese)
- [32] 代堰铭, 张连昌, 朱明田, 等. 鞍山陈台沟 BIF 铁矿与太古代地壳增生: 锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素约束[J]. *岩石学报*, 2013, 29(7): 2537–2550.
- Dai Y P, Zhang L C, Zhu M T, et al. Chentaigou BIF-type iron deposit, Anshan area associated with Archean crustal growth: Constraints from zircon U-Pb dating and Hf isotope[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(7): 2537–2550.
- [33] 李三忠, 郝德峰, 韩宗珠, 等. 胶辽地块古元古代构造-热演化与深部过程[J]. *地质学报*, 2003, 77(3): 328–340.
- Li S Z, Hao D F, Han Z Z, et al. Paleoproterozoic deep processes and tectono-thermal evolution in Jiao-Liao massif[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(3): 328–340.
- [34] 李超, 孙克克, 陈斌. 辽东营口-辽阳地区古元古代花岗岩和变质基性岩形成时代及意义[J]. *地球科学与环境学报*, 2017, 39(2): 143–160.
- Li C, Sun K K, Chen B. Paleoproterozoic granites and meta- mafic rocks from Yingkou-Liaoyang area of the eastern Liaoning and their significance[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2017, 39(2): 143–160.
- [35] 许王, 刘福来, 刘超辉. 胶-辽-吉造山带北辽河变基性岩的成因、地球化学属性及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2017, 33(9): 2743–2757.
- Xu W, Liu F L, Liu C H. Petrogenesis and geochemical characteristics of the North Liaohe metabasic rocks, Jiao-Liao-Ji orogenic belt and their tectonic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(9): 2743–2757.
- [36] 杨玉伟, 余超. 辽河群含硼岩系基性火山岩地球化学特征及形成环境[J]. *吉林地质*, 2016, 35(3): 44–47.
- Yang Y W, Yu C. Geochemical characteristics and forming environment of boron-bearing rock series base volcano rock in Liaohe Group[J]. *Jilin Geology*, 2016, 35(3): 44–47.
- [37] 李雪梅, 孙丰月, 李碧乐, 等. 辽东后仙峪硼矿床含硼岩系中电英岩的地球化学特征及其成因[J]. *世界地质*, 2008, 27(3): 260–266.
- Li X M, Sun F Y, Li B L, et al. Geochemistry and origin of tourmalite from boron-bearing rock series of Houxianyu borate deposit in eastern Liaoning[J]. *Global Geology*, 2008, 27(3): 260–266.
- [38] 王惠初, 任云伟, 陆松年, 等. 辽吉古元古代造山带的地层单元划分与构造属性[J]. *地球学报*, 2015, 36(5): 583–598.
- Wang H C, Ren Y W, Lu S N, et al. Stratigraphic units and tectonic setting of the Paleoproterozoic Liao-Ji orogen[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2015, 36(5): 583–598.
- [39] 杨玉伟, 于海峰, 石玉学, 等. 华北克拉通东部辽河群中两类斜长角闪岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *地质学报*, 2021, 95(12): 3705–3720.
- Yang Y W, Yu H F, Shi Y X, et al. Chronology, geochemical characteristics and geological significance of the two types of amphibolites within the Liaohe Group in the eastern block of the North China Craton[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(12): 3705–3720.
- [40] 杨玉伟, 余超, 苏特, 等. 辽东黑沟地区辽河群成因及其对辽吉造山带构造演化的制约[J]. *地质学报*, 2020, 94(5): 1397–1412.
- Yang Y W, Yu C, Su T, et al. Petrogenesis of the Liaohe Group from the Heigou area in the eastern Liaoning Province: Constraints on tectonic evolution of the Liao-Ji orogenic belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(5): 1397–1412.
- [41] 孟恩, 王朝阳, 刘超辉, 等. 辽东半岛东南部南辽河群变质火山岩的时代、成因及其对区域构造演化的制约[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2017, 47(6): 1589–1619.
- Meng E, Wang C Y, Liu C H, et al. Geochronology, petrogenesis and constraints on regional tectonic evolution of the meta-volcanic rocks in southeastern Liaodong Peninsula[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2017, 47(6): 1589–1619.
- [42] 毕君辉, 邢德和, 葛文春, 等. 辽东地区北辽河群变酸性火山岩形成的时代及构造背景: 古元古代陆内裂谷, 还是活动大陆边缘?[J]. *地学前缘*, 2018, 25(3): 295–308.
- Bi J H, Xing D H, Ge W C, et al. Age and tectonic setting of meta-acid volcanic rocks from the North Liaohe Group in the Liaodong

- area: Paleoproterozoic intracontinental rift or active continental margin? [J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(3): 295–308.
- [43]高铂森,董永胜,李富强,等.辽东黄花甸地区南辽河群里尔峪组成因研究[J].*岩石学报*,2017,33(9):2725–2742.
Gao B S, Dong Y S, Li F Q, et al. Petrogenesis of the Lieryu Formation of the South Liaohe Group in the Huanghuadian area, Liaodong Peninsula [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33 (9): 2725–2742.
- [44]陈斌,李壮,王家林,等.辽东半岛 ~2.2 Ga 岩浆事件及其地质意义[J].*吉林大学学报(地球科学版)*,2016,46(2):303–320.
Chen B, Li Z, Wang J L, et al. Liaodong Peninsula ~2.2 Ga magmatic event and its geological significance [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2016, 46(2): 303–320.
- [45]杨玉伟,余超,王广伟,等.辽东黑沟地区古元古代碱长花岗岩年代学、地球化学、Hf 同位素特征及其对辽吉造山带构造演化的制约[J].*地质学报*,2020,94(8):2212–2226.
Yang Y W, Yu C, Wang G W, et al. Chronology, geochemistry and zircon Hf isotopes of the Paleoproterozoic alkali feldspar granite from the Heigou area in the eastern Liaoning Province: Constraints on the tectonic evolution of the Liao-Ji orogenic belt [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(8): 2212–2226.
- [46]宋运红,杨凤超,闫国磊,等.辽东地区古元古代花岗岩 SHRIMP U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及构造意义[J].*地质学报*,2016,90(10):2620–2636.
Song Y H, Yang F C, Yan G L, et al. SHRIMP U-Pb ages and Hf isotopic compositions of paleoproterozoic granites from the eastern part of Liaoning Province and their tectonic significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(10): 2620–2636.
- [47]胡古月,范昌福,李延河,等.辽东明安硼镁矿床混合花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及对成矿时代的制约[J].*矿床地质*,2014,33(2):397–405.
Hu G Y, Fan C F, Li Y H, et al. Zircon U-Pb dating of migmatitic granites of Ming'an Mg-borate deposit in Kuandian area, eastern Liaoning Province, and its constrains on mineralization age [J]. *Mineral Deposits*, 2014, 33(2): 397–405.
- [48]杨明春,陈斌,闫聪.华北克拉通胶-辽-吉带古元古代条痕状花岗岩成因及其构造意义[J].*地球科学与环境学报*,2015,37(5):31–51.
Yang M C, Chen B, Yan C. Petrogenesis of Paleoproterozoic gneissic granites from Jiao-Liao-Ji belt of North China Craton and their tectonic implications [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2015, 37(5): 31–51.
- [49]Wu C, Wang G S, Zhou Z G, et al. Paleoproterozoic plate tectonics recorded in the Northern Margin Orogen, North China Craton [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2022, 23(11): e2022GC010662.
- [50]刘敬党,肖荣阁,王文武,等.辽东硼矿区域成矿模型[M].北京:地质出版社,2007.
Liu J D, Xiao R G, Wang W W, et al. Regional metallogenesis of borate deposit in eastern Liaoning, China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.
- [51]Yan X L, Chen B. Chemical and boron isotopic compositions of tourmaline from the Paleoproterozoic Houxianyu borate deposit, NE China: Implications for the origin of borate deposit [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 94: 252–266.
- [52]王翠芝,肖荣阁,刘敬党.辽宁翁泉沟橄榄玄武岩的地质地球化学特征及其形成环境[J].*地球学报*,2008,29(5):542–552.
Wang C Z, Xiao R G, Liu J D. Geological and geochemical characteristics and formation environment of the Wenquangou olivine basalt in Liaoning Province [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2008, 29 (5): 542–552.
- [53]Lu Y F, Chen Y C, Li H Q, et al. Metallogenic chronology of boron deposits in the eastern Liaoning Paleoproterozoic rift zone [J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2005, 79(3): 414–425.
- [54]赵宇霆,李子颖,郭春影.辽宁翁泉沟铁-硼-铀矿床成矿年代学研究[J].*铀矿地质*,2021,37(3):433–445.
Zhao Y T, Li Z Y, Guo C Y. Metallogenic chronology of Wengquangou Fe-B-U deposit in Liaoning [J]. *Uranium Geology*, 2021, 37 (3): 433–445.
- [55]李三忠,李玺瑶,戴黎明,等.前寒武纪地球动力学(VI):华北克拉通形成[J].*地学前缘*,2015,20(6):77–96.
Li S Z, Li X Y, Dai L M, et al. Precambrian geodynamics (VI): Formation of North China Craton [J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(6): 77–96.
- [56]相振群,陆松年,李怀坤,等.华北克拉通中元古代岩浆事件群[J].*地质调查与研究*,2020,43(2):137–152.
Xiang Z Q, Lu S N, Li H K, et al. Mesoproterozoic magmatic events in the North China Craton [J]. *Geological Survey and Research*, 2020, 43(2): 137–152.
- [57]邵军,李永飞,周永恒,等.中国东北额尔古纳地块新太古代岩浆事件——钻孔片麻状二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS 测年证据[J].*吉林大学学报(地球科学版)*,2015,45(2):364–373.
Shao J, Li Y F, Zhou Y H, et al. Neo-Archaean magmatic event in Erguna massif of Northeast China: Evidence from the zircon LA-ICP-MS dating of the gneissic monzogranite from the drill [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2015, 45(2): 364–373.
- [58]孙立新,任邦方,赵凤清,等.额尔古纳地块太平川巨斑状花岗岩的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征[J].*地学前缘*,2012,19(5):114–122.
Sun L X, Ren B F, Zhao F Q, et al. Zircon U-Pb ages and Hf isotope characteristics of Taipingchuan large porphyritic granite pluton of Erguna massif in the Great Xing'an Range [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(5): 114–122.
- [59]赵硕,许文良,唐杰,等.额尔古纳地块新元古代岩浆作用与微陆块构造属性:来自侵入岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Hf 同位

- 素的制约[J]. 地球科学, 2016, 41(11): 1803-1829.
- Zhao S, Xu W L, Tang J, et al. Neoproterozoic magmatic events and tectonic attribution of the Erguna massif: Constraints from geochronological, geochemical and Hf isotopic data of intrusive rocks [J]. *Earth Science*, 2016, 41(11): 1803-1829.
- [60] 钱程, 陈会军, 陆露, 等. 黑龙江省龙江地区新太古代花岗岩的发现[J]. 地球学报, 2018, 39(1): 27-36.
- Qian C, Chen H J, Lu L, et al. The discovery of Neoproterozoic granite in Longjiang area, Heilongjiang Province [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2018, 39(1): 27-36.
- [61] Wu X W, Zhang C, Zhang Y J, et al. 2.7 Ga monzogranite on the songnen massif and its geological implications [J]. *Acta Geologica Sinica: English Edition*, 2018, 92(3): 1265-1266.
- [62] Zhang C, Wu X W, Guo W, et al. Discovery of the 1.8 Ga granite on the western margin of the Songnen Massif, China [J]. *Acta Geologica Sinica: English Edition*, 2017, 91(4): 1497-1498.
- [63] 孙立新, 任邦方, 赵凤清, 等. 内蒙古锡林浩特地块中元古代花岗岩片麻岩的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征[J]. 地质通报, 2013, 32(2/3): 327-340.
- Sun L X, Ren B F, Zhao F Q, et al. Zircon U-Pb dating and Hf isotopic compositions of the Mesoproterozoic granitic gneiss in Xilinhot Block, Inner Mongolia [J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(2/3): 327-340.
- [64] Wang F, Xu W L, Gao F H, et al. Precambrian terrane within the Songnen-Zhangguangcai range massif, NE China: Evidence from U-Pb ages of detrital zircons from the Dongfengshan and Tadong groups [J]. *Gondwana Research*, 2014, 26(1): 402-413.
- [65] Luan J P, Wang F, Xu W L, et al. Provenance, age, and tectonic implications of Neoproterozoic strata in the Jiamusi Massif: Evidence from U-Pb ages and Hf isotope compositions of detrital and magmatic zircons [J]. *Precambrian Research*, 2017, 297: 19-32.
- [66] 裴福萍, 许文良, 杨德彬, 等. 松辽盆地基底变质岩中锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 科学通报, 2006, 51(24): 2881-2887.
- Pei F P, Xu W L, Yang D B, et al. Zircon U-Pb geochronology of basement metamorphic rocks in the Songliao Basin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(7): 942-948.
- [67] 周建波, 张兴洲, Wilde S A, 等. 中国东北 ~500 Ma 泛非期孔兹岩带的确定及其意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(4): 1235-1245.
- Zhou J B, Zhang X Z, Wilde S A, et al. Confirming of the Heilongjiang ~500 Ma Pan-African khondalite belt and its tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(4): 1235-1245.
- [68] 杨晓平, 马江水, 庞雪娇, 等. 黑龙江多宝山地区早古生代沟-弧-盆体系重建[J]. 岩石学报, 2022, 38(8): 2269-2291.
- Yang X P, Ma J S, Pang X J, et al. Reconstruction of Early Paleozoic trench-arc-basin system in Duobaoshan area, Heilongjiang Province, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(8): 2269-2291.
- [69] Zhao C, Qin K Z, Song G X, et al. Early Palaeozoic high-Mg basalt-andesite suite in the Duobaoshan porphyry Cu deposit, NE China: Constraints on petrogenesis, mineralization, and tectonic setting [J]. *Gondwana Research*, 2019, 71: 91-116.
- [70] 韩伟, 冯志强, 刘永江, 等. 跃进山杂岩的地质年代学和地球化学证据及其构造演化意义[J]. 岩石学报, 2022, 38(8): 2489-2509.
- Han W, Feng Z Q, Liu Y J, et al. Geochronological and geochemical constraints from the Yuejinshan complex and its implications for the tectonic evolution of Northeast China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(8): 2489-2509.
- [71] 曾振, 张兴洲, 周建波. 跃进山杂岩中二叠纪辉长岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义[J]. 地质论评, 2017, 63(S1): 267-268.
- Zeng Z, Zhang X Z, Zhou J B. Geochemistry and zircon U-Pb age of Middle Permian gabbros in the Yuejinshan complexes and its tectonic implications [J]. *Geological Review*, 2017, 63(S1): 267-268. (in Chinese)
- [72] 曾振, 张兴洲, 周建波, 等. 跃进山杂岩中二叠纪变玄武岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2018, 42(2): 365-378.
- Zeng Z, Zhang X Z, Zhou J B, et al. Geochemistry and zircon U-Pb age of Permian metabasalts in the Yuejinshan complexes and its tectonic implications [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2018, 42(2): 365-378.
- [73] Sun M D, Xu Y G, Wilde S A, et al. The Permian Dongfanghong island-arc gabbro of the Wandashan orogen, NE China: Implications for Paleo-Pacific subduction [J]. *Tectonophysics*, 2015, 659: 122-136.
- [74] 郭治. 黑龙江省东部跃进山杂岩的性质及构造演化[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- Guo Y. The nature of the Yuejinshan complex in the eastern part of Heilongjiang Province and its evolution [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [75] 崔维龙. 佳木斯地块东缘二叠纪俯冲洋壳的发现及意义[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- Cui W L. The discovery and significance of Permian subducting oceanic crust on the eastern margin of Jiamusi Massif, NE China [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [76] 毕君辉. 佳木斯地块东缘晚古生代构造-岩浆演化[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- Bi J H. Late Paleozoic tectonic-magmatic evolution of the eastern Jiamusi Massif [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [77] 李功宇, 周建波, 李龙, 等. 佳木斯地块东缘晚古生代大陆边缘构造演化[J]. 岩石学报, 2020, 36(6): 1719-1730.
- Li G Y, Zhou J B, Li L, et al. The Late Paleozoic continental margin tectonic evolution at the eastern margin of the Jiamusi Block [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(6): 1719-1730.
- [78] 李功宇, 周建波, 李皓东, 等. 吉黑东部晚古生代构造体制转换:

- 来自佳木斯-兴凯地块的双增生杂岩及岛弧岩浆岩带的制约[J]. 岩石学报, 2022, 38(9): 2743-2761.
- Li G Y, Zhou J B, Li H D, et al. The transition of the Late Paleozoic tectonic regime in eastern Jilin and Heilongjiang provinces: Constraints from the double accretionary complex and island arc magmatic rock belts in the Jiamusi-Khanka Block [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(9): 2743-2761.
- [79]周建波, 蒲先刚, 侯贺晟, 等. 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[J]. 岩石学报, 2018, 34(10): 2845-2856.
- Zhou J B, Pu X G, Hou H S, et al. The Mesozoic accretionary complex in NE China and its tectonic implications for the subduction of the Paleo-Pacific plate beneath the Eurasia [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(10): 2845-2856.
- [80]李伟民, 刘永江, 赵英利, 等. 佳木斯地块构造演化[J]. 岩石学报, 2020, 36(3): 665-684.
- Li W M, Liu Y J, Zhao Y L, et al. Tectonic evolution of the Jiamusi Block, NE China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(3): 665-684.
- [81]董玉. 佳木斯地块与松嫩-张广才岭地块拼合历史: 年代学与地球化学证据[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- Dong Y. Convergence history of the Jiamusi and Songnen-Zhanguangcai Range massifs: Geochronological and geochemical evidence [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [82]葛茂卉, 张进江, 刘恺, 等. 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, 2019, 54(4): 1265-1289.
- Ge M H, Zhang J J, Liu K, et al. 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*, 2019, 54(4): 1265-1289.
- [83]周静. 吉林省青龙村地区超基性岩地球化学特征及其构造意义[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- Zhou J. Geochemical characteristics of ultrabasic rock and its tectonic significance in Qinglongcun area, Jilin Province [D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [84]Ge M H, Zhang J J, Li L, et al. Geochronology and geochemistry of the Heilongjiang complex and the granitoids from the Lesser Xing'an-Zhanguangcai Range: Implications for the Late Paleozoic-Mesozoic tectonics of eastern NE China [J]. *Tectonophysics*, 2017, 717: 565-584.
- [85]Zhou J B, Wilde S A, Zhang X Z, et al. The onset of Pacific margin accretion in NE China: Evidence from the Heilongjiang high-pressure metamorphic belt [J]. *Tectonophysics*, 2009, 478(3/4): 230-246.
- [86]周建波, 韩杰, 张兴洲, 等. 牡丹江地区蓝片岩的地球化学特征及其大地构造意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(1): 93-103.
- Zhou J B, Han J, Zhang X Z, et al. Geochemical characteristics of the Mudanjiang blueschists in the NE China and its tectonic implications [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2010, 40(1): 93-103.
- [87]周建波, 韩杰, Wilde S A, 等. 吉林-黑龙江高压变质带的初步厘定: 证据和意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(2): 386-398.
- Zhou J B, Han J, Wilde S A, et al. A primary study of the Jilin-Heilongjiang high-pressure metamorphic belt: Evidence and tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(2): 386-398.
- [88]葛茂卉, 张进江, 刘恺, 等. 黑龙江杂岩中蓝片岩的地球化学特征和云母片岩的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 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, 2020, 55(4): 1179-1201.
- Ge M H, Zhang J J, Liu K, et al. 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 [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2020, 55(4): 1179-1201.
- [89]张夺, 刘永江, 李伟民, 等. 佳木斯地块及邻区早古生代-晚中生代构造演化[J]. 世界地质, 2018, 37(4): 1149-1166.
- Zhang D, Liu Y J, Li W M, et al. Early Paleozoic-Late Mesozoic tectonic evolution in Jiamusi Block and adjacent areas [J]. *Global Geology*, 2018, 37(4): 1149-1166.
- [90]刘建峰, 李锦轶, 迟效国, 等. 内蒙古东南部早三叠世花岗岩带岩石地球化学特征及其构造环境[J]. 地质学报, 2014, 88(9): 1677-1690.
- Liu J F, Li J Y, Chi X G, et al. Petrological and geochemical characteristics of the Early Triassic granite belt in southeastern Inner Mongolia and its tectonic setting [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(9): 1677-1690.
- [91]陈井胜, 李巍巍, 时溢, 等. 华北板块北缘东段三叠纪构造演化——来自辽北开原岩浆岩年代学、地球化学的证据[J]. 岩石学报, 2022, 38(8): 2216-2248.
- Chen J S, Li W W, Shi Y, et al. Evolution of the eastern segment of the northern margin of the North China Craton in the Triassic: Evidence from the geochronology and geochemistry of magmatic rocks in Kaiyuan area, North Liaoning [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(8): 2216-2248.
- [92]李斌, 时溢, 杨帆, 等. 华北板块北缘东段中志留世-晚泥盆世构造演化: 来自公主岭地区岩浆岩的证据[J]. 岩石学报, 2022, 38(8): 2364-2396.
- Li B, Shi Y, Yang F, et al. Middle Silurian-Late Devonian tectonic evolution in the eastern segment of the northern margin of the North China Plate: Evidence from magmatic rocks in Gongzhuling area [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(8): 2364-2396.
- [93]Shi Y, Shi S S, Liu Z H, et al. Back-arc system formation and extinction in the southern Central Asian Orogenic Belt: New constraints from the Faku ophiolite in North Liaoning, NE China [J]. *Gondwana*

- Research, 2022, 103: 64–83.
- [94] Song Z G, Han C, Liu H, et al. Early-Middle Ordovician intermediate-mafic and ultramafic rocks in central Jilin Province, NE China: Geochronology, origin, and tectonic implications[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2019, 113(3): 393–415.
- [95] 许文良, 王枫, 裴福萍, 等. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景: 来自中生代火山岩组合时空变化的制约[J]. *岩石学报*, 2013, 29(2): 339–353.
- Xu W L, Wang F, Pei F P, et al. Mesozoic tectonic regimes and regional ore-forming background in NE China: Constraints from spatial and temporal variations of Mesozoic volcanic rock associations [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(2): 339–353.
- [96] 张丽, 张超, 刘永江, 等. 辽北地区早石炭世变质火山岩年代学和地球化学特征: 对华北板块北缘东段构造演化的启示[J]. *岩石学报*, 2020, 36(8): 2394–2412.
- Zhang L, Zhang C, Liu Y J, et al. Geochronology and geochemistry of the Early Carboniferous meta-volcanic rocks, northern Liaoning Province: Implications for the tectonic evolution of the eastern segment of the northern margin of the North China Block [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(8): 2394–2412.
- [97] 张超, 权京玉, 张丽, 等. 华北板块北缘东段泥盆纪伸展作用: 来自辽北昌图碰撞后岩浆岩的证据[J]. *岩石学报*, 2022, 38(8): 2345–2363.
- Zhang C, Quan J Y, Zhang L, et al. Devonian extension of the eastern section of the northern margin of the North China Plate: Evidence from post-collision magmatic rocks in Changtu area, northern Liaoning Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(8): 2345–2363.
- [98] 时溢, 陈井胜, 魏明辉, 等. 古亚洲洋东段晚古生代演化过程: 辽宁北部法库地区花岗岩年代学和地球化学的制约[J]. *岩石学报*, 2020, 36(11): 3287–3308.
- Shi Y, Chen J S, Wei M H, et al. Evolution of eastern segment of the Paleo-Asian Ocean in the Late Paleozoic: Geochronology and geochemistry constraints of granites in Faku area, North Liaoning, NE China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(11): 3287–3308.
- [99] 刘建峰. 内蒙古林西-东乌旗地区晚古生代岩浆作用及其对区域构造演化的制约[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- Liu J F. Late Paleozoic Magmatism and its constraints on regional tectonic evolution in Linxi-Dongwuqi Area, Inner Mongolia [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [100] 潘桂棠, 肖庆辉, 张克信, 等. 大陆中洋壳俯冲增生杂岩带特征与识别的重大科学意义[J]. *地球科学*, 2019, 44(5): 1544–1561.
- Pan G T, Xiao Q H, Zhang K X, et al. Recognition of the oceanic subduction-accretion zones from the orogenic belt in continents and its important scientific significance [J]. *Earth Science*, 2019, 44(5): 1544–1561.
- [101] 唐杰, 许文良, 王枫, 等. 古太平洋板块在欧亚大陆下的俯冲历史: 东北亚陆缘中生代—古近纪岩浆记录[J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(5): 549–583.
- Tang J, Xu W L, Wang F, et al. Subduction history of the Paleopacific slab beneath Eurasian continent: Mesozoic-Paleogene magmatic records in Northeast Asia [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(5): 527–559.
- [102] Deng C Z, Sun D Y, Han J S, et al. Late-stage southwards subduction of the Mongol-Okhotsk oceanic slab and implications for porphyry Cu-Mo mineralization: Constraints from igneous rocks associated with the Fukeshan deposit, NE China [J]. *Lithos*, 2019, 326–327: 341–357.
- [103] 李强, 程学芹, 陈伟, 等. 额尔古纳地块早—中三叠世安山岩的发现及其对蒙古—鄂霍茨克洋南向俯冲的指示[J]. *地球科学*, 2021, 46(8): 2768–2785.
- Li Q, Cheng X Q, Chen W, et al. Discovery of Early-Middle Triassic andesite in Erguna massif and its indication of southward subduction of Mongol-Okhotsk Ocean Plate [J]. *Earth Science*, 2021, 46(8): 2768–2785.
- [104] 李文龙, 杨晓平, 钱程, 等. 大兴安岭北段富克山岩浆弧的组成: 对蒙古—鄂霍茨克洋南向俯冲的制约[J]. *地质学前沿*, 2022, 29(2): 146–163.
- Li W L, Yang X P, Qian C, et al. Composition of the Fukeshan magmatic arc in the northern Great Xing'an Range: Constraints on the southward subduction of the Mongol-Okhotsk oceanic plate [J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(2): 146–163.
- [105] 杨华本, 王文东, 闫永生, 等. 大兴安岭北段新林区塔木兰沟组火山岩成因及地幔富集作用[J]. *地质论评*, 2016, 62(6): 1471–1486.
- Yang H B, Wang W D, Yan Y S, et al. Origin of basalts of the Tamulangou Formation and mantle enrichment in Xinlin area, northern Greater Hinggan Mountains [J]. *Geological Review*, 2016, 62(6): 1471–1486.
- [106] 杨晓平, 胡道功, 刘晓佳, 等. 东北漠河盆地开库康组 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. *地球科学与环境学报*, 2018, 40(3): 237–251.
- Yang X P, Hu D G, Liu X J, et al. LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb ages of Kaikukang Formation and their tectonic implications in Mohe Basin, Northeast China [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2018, 40(3): 237–251.
- [107] Guo Z X, Yang Y T, Zhabrev S, et al. Tectonostratigraphic evolution of the Mohe-Upper Amur Basin reflects the final closure of the Mongol-Okhotsk Ocean in the latest Jurassic-earliest Cretaceous [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 145: 494–511.

- Daxiyingzi Rb-Be deposit on the northern margin of the North China Craton: Evidence from $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ ages and geochemical data[J]. *Ore Geology Reviews*, 2022, 150: 105152.
- [41]刁纯才, 凤金龙, 于金辉, 等. 辽宁新宾李家堡子铌钽矿床地质特征[J]. *地质与资源*, 2013, 22(1): 20-24.
- Diao C C, Feng J L, Yu J H, et al. Geological characteristics of the Lijiapuzi niobium-tantalum deposit in Xinbin County, Liaoning Province[J]. *Geology and Resources*, 2013, 22(1): 20-24.
- [42]姚玉增, 李立兴, 付建飞, 等. 华北克拉通辽宁李家堡子早前寒武纪花岗伟晶岩型铌钽成矿的年龄证据[J]. *地质通报*, 2023, 42(6): 1047-1049.
- Yao Y Z, Li L X, Fu J F, et al. Geochronological constraints on Early Precambrian granitic pegmatite type Nb-Ta mineralization of the Lijiapuzi deposit in North China Craton[J]. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(6): 1047-1049.
- [43]Fu J F, Yao Y Z, Liu J, et al. Geology and petrogeochemistry of Lijiapuzi Nb-Ta granitic pegmatite deposit: Implications for ore genesis and prospecting[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(5): 2542.
- [44]尹志刚, 李萌萌, 吴子杰, 等. 辽宁本溪地区新太古代晚期钾质花岗岩的发现及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2024, 54(1): 125-139.
- Yin Z G, Li M M, Wu Z J, et al. The discovery and geological implications of late Neoproterozoic kaligranites in Benxi area, Liaoning Province [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2024, 54(1): 125-139.
- [45]Guo R R, Li Z H, Liu S W, et al. Late Neoproterozoic geodynamic regime of the northeastern North China Craton: Constraints from metamorphosed volcanic rocks of the Anshan-Benxi greenstone belt [J]. *Precambrian Research*, 2022, 371: 106583.
- [46]耿元生, 杨崇辉, 宋彪, 等. 吕梁地区 18 亿年的后造山花岗岩: 同位素年代和地球化学制约[J]. *高校地质学报*, 2004, 10(4): 477-487.
- Geng Y S, Yang C H, Song B, et al. Post-orogenic granites with an age of 1800 Ma in Luliang area, North China Craton: Constraints from isotopic geochronology and geochemistry[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2004, 10(4): 477-487.
- [47]Zhang S H, Liu S W, Zhao Y, et al. The 1.75-1.68 Ga anorthosite-mangerite-alkali granitoid-rapakivi granite suite from the northern North China Craton: Magmatism related to a paleoproterozoic orogen [J]. *Precambrian Research*, 2007, 155(3/4): 287-312.
- [48]Shi L, Zheng C Q, Yao W G, et al. Geochronological framework and tectonic setting of the granitic magmatism in the Chaihe-Moguqi region, central Great Xing'an Range, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 113: 443-453.
- [49]Zhang S H, Zhao Y, Davis G A, et al. Temporal and spatial variations of Mesozoic magmatism and deformation in the North China Craton: Implications for lithospheric thinning and decratonization[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 131: 49-87.
- [50]李世超, 李永飞, 王兴安, 等. 大兴安岭中段晚三叠世四分组效应花岗岩的厘定及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2016, 32(9): 2793-2806.
- Li S C, Li Y F, Wang X A, et al. Delineation of the Late Triassic granitic pluton from the middle part of Greater Xing'an Mountains showing tetrad REE patterns and its geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(9): 2793-2806.

(上接第 446 页/Continued from Page 446)

- [108]江思宏, 张莉莉, 刘翼飞, 等. 兴蒙造山带成矿规律及若干科学问题[J]. *矿床地质*, 2018, 37(4): 671-711.
- Jiang S H, Zhang L L, Liu Y F, et al. Metallogeny of Xing-Meng Orogenic Belt and some related problems [J]. *Mineral Deposits*, 2018, 37(4): 671-711.
- [109]Xu W L, Pei F P, Wang F, et al. 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*, 2013, 74: 167-193.
- [110]Tang J, Xu W L, Wang F, et al. Early Mesozoic southward subduction history of the Mongol-Okhotsk oceanic plate: Evidence from geochronology and geochemistry of Early Mesozoic intrusive rocks in the Erguna Massif, NE China [J]. *Gondwana Research*, 2016, 31: 218-240.
- [111]Koppers A A P, Staudigel H, Duncan R A. High-resolution $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the oldest oceanic basement basalts in the western Pacific basin[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, 4(11): 8914.
- [112]Seton M, Müller R D, Zahirovic S, et al. Global continental and ocean basin reconstructions since 200 Ma[J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 113(3/4): 212-270.