

欧亚北极地区西部区域地质与构造演化

李学杰¹, 姚永坚¹, 杨楚鹏¹, 陈振林², 汪俊¹, 祝嵩¹, 李波¹

(1. 广州海洋地质调查局, 国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广州 510760;

2. 中国地质大学 资源学院, 武汉 430074)

摘要: 欧亚北极地区西部, 西起北大西洋东岸, 东至上扬斯克山脉, 区域地质构造复杂。根据其构造特征, 以乌拉尔-新地岛-泰梅尔造山带为界, 可以分为东西两区。西区主要构造单元包括前寒武纪的波罗的克拉通与斯瓦尔巴微板块以及蒂曼造山带、加里东造山带和乌拉尔-新地岛造山带等, 而东区主要包括西伯利亚克拉通及上扬斯克造山带。本区主要经历4次大的构造事件:(1)新元古代至早寒武世的蒂曼造山运动, 使得波罗的古陆与斯瓦尔巴-喀拉微板块碰撞造山, 形成蒂曼造山带;(2)早古生代, 奥陶纪-志留纪的加里东造山运动, 使波罗的与劳伦碰撞造山, 形成加里东造山带;(3)晚古生代, 哈萨克斯坦板块与波罗的古陆与西伯利亚古陆的碰撞, 形成乌拉尔-新地岛-泰梅尔造山带;(4)早白垩世, 科雷马-奥莫隆复合超地体及阿拉斯加-楚科塔微板块与西伯利亚大陆边缘碰撞拼贴, 形成上扬斯克造山带和南阿纽伊缝合线。

关键词: 区域地质; 构造演化; 欧亚北极区

中图分类号: P736.1

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2015)03-0123-11

1 概述

北极地区资源十分丰富, 尤其是油气资源, 据美国地质调查局估计, 北极地区待发现可开采油气资源储量为石油 126×10^8 t、天然气 46.73×10^{12} m³、凝析油总量 61.6×10^6 t^[1-2]。而俄罗斯学者的估计要大得多, 认为北极地区油气资源总量约为 1413×10^8 t 油当量, 其中 513×10^8 t 石油^[3-4]; 天然气储量估计为 800×10^8 m³, 约为全球天然气储量的 41%。挪威国家石油公司(Statoil)最新资料也认为, 北极地区待发现剩余油气资源量约占世界总量的 1/4^[5]。

本文的北极地区西部, 西起北大西洋东岸, 包括斯堪的纳维亚半岛, 巴伦支海、喀拉海、拉普捷夫海至上扬斯克山脉(图 1)。该区以陆架特别宽广, 盆地发育, 油气资源极为丰富为特征。同时该区油气勘探程度在北极地区也相对较高。

东北极地区区域地质构造相当复杂, 受自然条件的限制, 一些构造问题的认识程度还较低, 还有待进一步研究^[6-9]。本文在收集整理大量北极区域地质资料的基础上, 编制该区地质构造简图(图 2), 结合重力异常(图 3), 并对主要构造特征进行分析。

欧亚北极地区西部主要构造单元包括前寒武纪的波罗的克拉通、西伯利亚克拉通及斯瓦尔巴微板块, 以及不同时代的造山带(图 2), 以乌拉尔-新地岛-泰梅尔造山带为界, 可以分为东西两区。

2 西区构造特征

北极欧亚大陆西部, 从挪威西部往东至乌拉尔山脉和新地岛, 包括巴伦支海和喀拉海大陆架以及斯瓦尔巴群岛、法兰士约瑟夫地群岛等(图 1), 构造单元包括蒂曼造山带、加里东造山带、波罗的克拉通、斯瓦尔巴-喀拉微板块以及乌拉尔-新地岛造山带等。巴伦支海和喀拉海的油气资源勘探使得欧亚大陆地质构造可能是整个北极研究程度最高的地区^[10]。

2.1 波罗的克拉通

波罗的克拉通, 又称东欧克拉通, 构成北欧的主体, 是北极地区三大克拉通之一, 主要分布于瑞典、芬兰北部和俄罗斯的西北部地区, 其西部为加里东造山带与古大西洋(Iapetus)缝合线, 北部、东部为蒂曼造山带, 东南为乌拉尔缝合线(图 2)。

波罗的克拉通具有太古宙和古元古代变质基底, 基底之上由近水平或缓倾斜的新元古生界、古生界和中新生界组成^[6]。在地貌上属东欧平原, 具有太古宙和古元古代变质基底^[13]。

基金项目: 国土资源部专项项目(GZH20120601)

作者简介: 李学杰(1964—), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事海洋地质与区域地质的调查与研究, E-mail: xuejeli@yeah.net

收稿日期: 2015-04-20; 改回日期: 2015-05-15。 周立君编辑

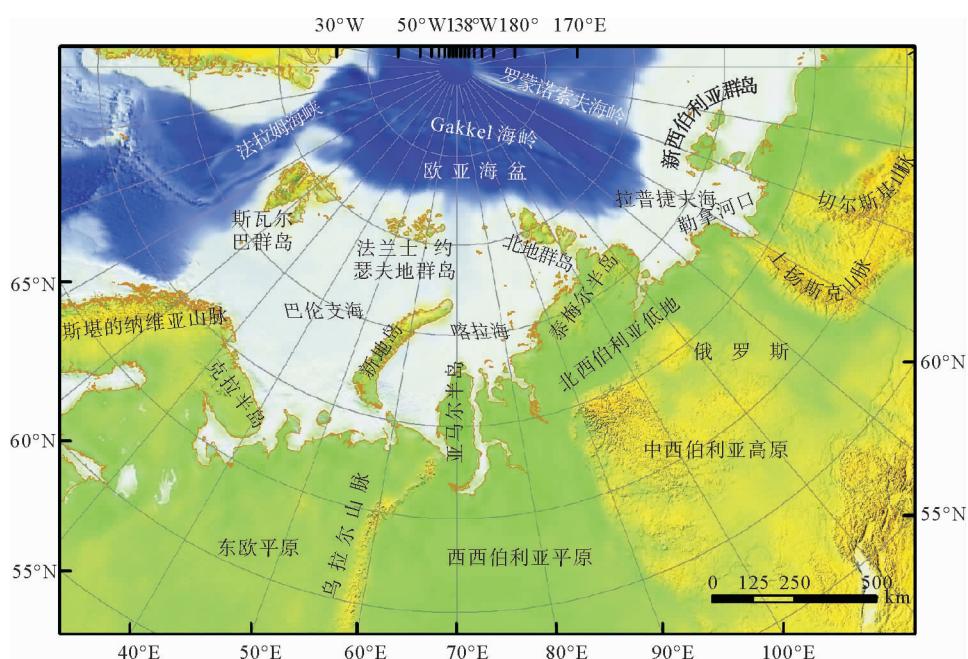


图1 欧亚北极区西部位置

Fig. 1 Location of the Western Euroasian Arctic region

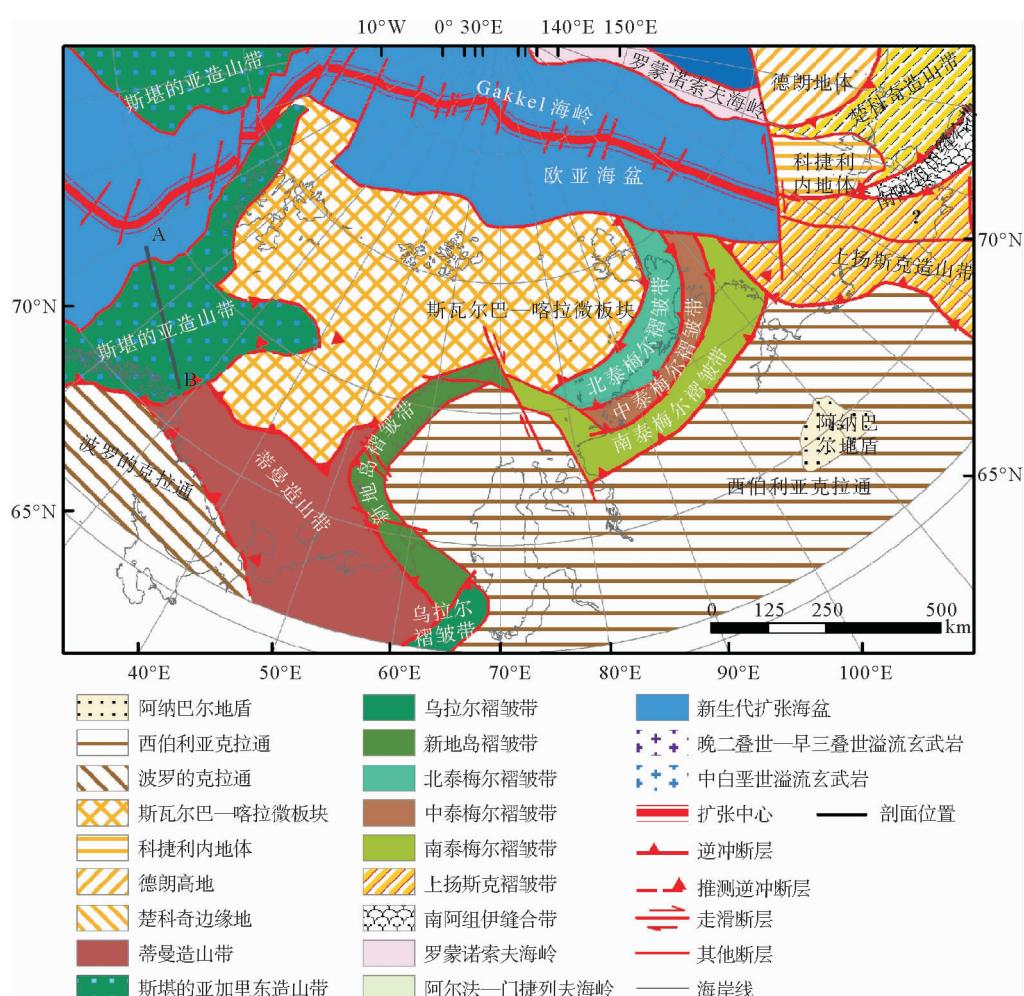


图2 欧亚北极区西部区域构造简图

Fig. 2 Tectonic scheme of the Western Euroasian Arctic region

2.2 斯瓦尔巴-喀拉微板块

巴伦支-喀拉陆缘基底为斯瓦尔巴-喀拉微板块,西为加里东造山带、南为蒂曼-瓦朗厄尔造山带,东南为新地岛褶皱带,东为北泰梅尔造山带(图2)。斯瓦尔巴-喀拉微板块构造在斯瓦尔巴群岛以及新地岛、北地群岛和泰梅尔半岛的局部地区研究较详细。

该微板块由两个地体组成,东部为喀拉地体,西部为斯瓦尔巴,其中法兰士·约瑟夫地和斯匹次卑尔根群岛位于海平面之上(图2)。

2.2.1 斯瓦尔巴地体

斯瓦尔巴地体几乎占据巴伦支海全区,包括斯瓦尔巴群岛^[14]。在斯瓦尔巴群岛出露有太古宙-中元古代结晶基底和新元古代-早古生代沉积盖层^[15],两者为显著的构造不整合^[10]。在斯匹次卑尔根岛 Ny Friesland 半岛基底原岩年龄为 1 750 Ma,变粒玄岩岩墙年龄 1 300 Ma^[16]。因此推测,斯瓦尔巴基底形成于罗迪尼(Rodinia)合并时的碰撞事件。

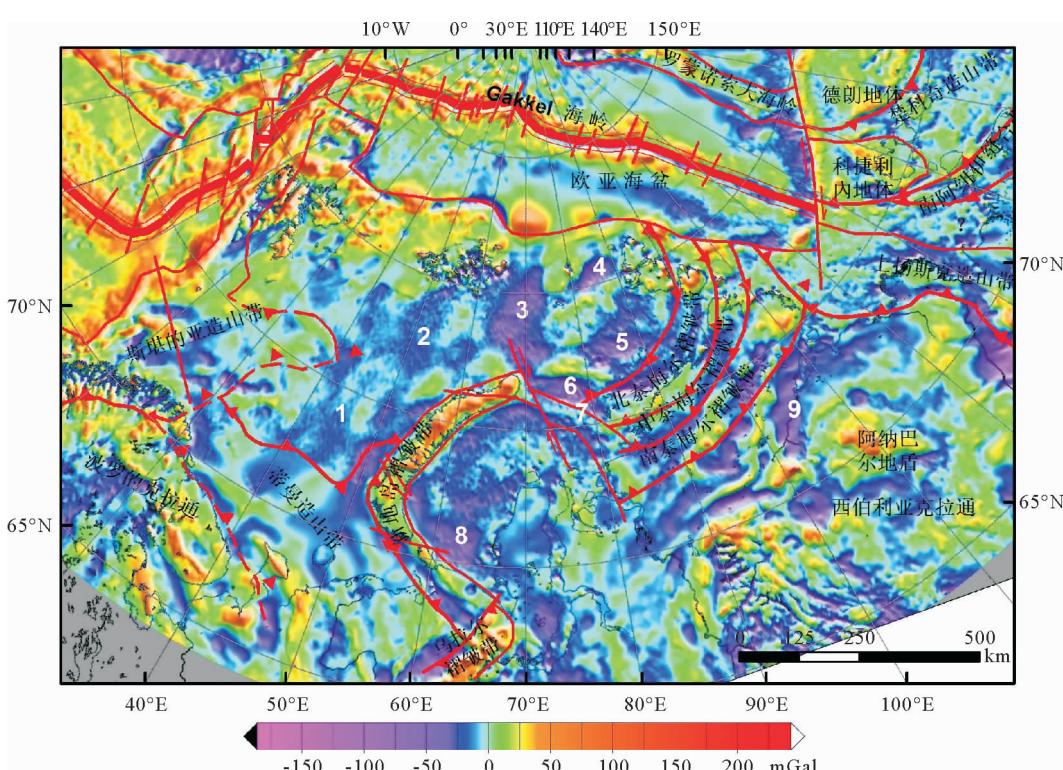
2.2.2 喀拉地体(KM)

喀拉地体(KM),又称为喀拉微大陆、喀拉地块

或北喀拉地体,位于北喀拉海北部,包括部分新地岛和泰梅尔北部,以北西伯利亚穹隆构造线与南喀拉盆地的晚古生代到早中生代基底相隔。构造上,喀拉地体将晚古生代至早中生代南喀拉盆地基底与明显线性的北西伯利亚基底穹隆分开^[9]。喀拉地体研究程度很低,其地质构造主要根据北地群岛^[17]和北泰梅尔半岛推测^[18-20]。

喀拉地体基底主要出露于泰梅尔半岛北部及其北侧的布尔什维克岛,包括已变形和变质的低级绿片岩相到中级角闪岩相中元古代(里菲期)硅质碎屑浊积岩^[21]。碎屑矿物的锆石年龄表明,其物源来自蒂曼期波罗的古陆,因此新元古代喀拉地体是波罗的古陆的一部分^[22]。布尔什维克岛新元古代变质浊积岩表明,新元古代属挤压变形和变质阶段,可能与 740~600 Ma 喀拉地体与岛弧地体碰撞(现在的泰梅尔褶皱带中部)有关^[23]。

喀拉地体南部边界为右旋走滑断裂带,这表明泰梅尔-新地岛造山带形成时走滑构造的重要性。形成时间确定为晚古生代变质作用和花岗岩类岩浆作用(306~260 Ma)^[19]。



1. 南巴伦支次盆,2. 北巴伦支次盆,3. 圣安娜槽,4. 施密特槽,5. 北喀拉盆地,6. Litke 槽,
7. 北西伯利亚穹隆,8. 南喀拉海盆地,9. 叶尼塞-哈坦加盆地

图3 东北极地区空间重力异常图(数据引自文献[11-12])

Fig. 3 Free-air gravity anomaly in the Western Euroasian Arctic region (data from references[11-12])

2.3 蒂曼造山带

蒂曼造山带,或贝加尔造山带,形成于新元古代-寒武纪之交,不连续分布于斯瓦尔巴-喀拉微板块的南缘(图2)。该造山带往东被乌拉尔构造截断,往西以加里东构造为界^[20]。

蒂曼造山运动时间,主要依据岩浆岩的放射性定年,推测蒂曼造山前的拉伸背景的碱性岩墙岩浆作用时间约610 Ma^[24],蒂曼期挤压相关的同构造期俯冲侵入时间约560 Ma^[6]。新地岛南部、泰梅尔和北地群岛在早寒武世存在区域不整合,表明蒂曼造山运动持续到约500 Ma^[22]。因此,蒂曼造山期为约610~500 Ma。

该构造带从西往东不连续,西部为蒂曼-瓦朗厄尔段,东部为喀拉-泰梅尔段。总体上由西往东该构造的出露及研究程度下降。该构造带是否东延仍颇有争议。在弗兰格尔岛、楚科奇、苏厄德半岛和布鲁克斯山脉已发现蛇绿岩和花岗岩链^[25],弗兰格尔岛变质基性岩锆石U-Pb定年为699±1 Ma^[6]。因此,该构造带有可能东延至楚科奇-阿拉斯加,但资料很少,在此不作讨论。

2.3.1 蒂曼-瓦朗厄尔段

蒂曼造山带西部蒂曼-瓦朗厄尔段,位于斯堪的纳维亚半岛北部,介于斯瓦尔巴-喀拉微板块与波罗的大陆之间,研究程度较高(图2)。该段西北以加里东造山带为界(图2),后者可能含有蒂曼造山带的碎块。东部,乌拉尔和新地岛的海西推覆体逆冲至该造山带之上。在乌拉尔,蒂曼构造总体走向西北,与海西期构造明显不同^[26]。新资料证实蒂曼造山带是波罗的古陆与斯瓦尔巴-喀拉微板块碰撞的结果^[10]。

俄罗斯北极区北西向蒂曼山脉是蒂曼造山带的典型区。成冰纪(830~630 Ma)波罗的古陆北东被动陆缘变为前陆,至埃迪卡拉纪(610~540 Ma),斯瓦尔巴-喀拉微板块的俯冲碰撞,导致向波罗的古陆增生,形成蒂曼造山带^[10]。在蒂曼山脉,该期变形特征明显,包括覆盖于波罗的太古宙和古元古代结晶基底之上的中新元古代岩体^[27]。在欧亚北极区,从北东向南西逆冲产生轮廓清晰的NW—SE向走滑,其海域延伸进入巴伦支海陆架区^[28]。往北东方向,蒂曼造山带消失于伯朝拉盆地和东巴伦支盆地很厚的新生界地层之下,但从少量的钻孔揭示^[16]及极地乌拉尔内陆东部出现的同时代Enganeppe蛇

绿岩中可以得知。

2.3.2 喀拉-泰梅尔段

蒂曼造山带喀拉-泰梅尔段应是蒂曼-瓦朗厄尔段的向东延伸,其形成时应是连续的。该段构造受到海西运动的强烈影响,碎块主要出露在海西造山带内(图2),位于喀拉-泰梅尔段的中泰梅尔带,由新元古代洋的岩石-构造体组成,包括里菲-文德期超镁铁岩、带状辉长岩、火山岩、页岩和凝灰质石英岩,洋壳、边缘海和岛弧型岩石等^[18]。蛇绿岩包括拉斑玄武岩和岛弧玄武岩,与蛇绿岩同成因的斜长花岗岩,测年为760~630 Ma。石榴石角闪岩的变质作用年为600 Ma,该年龄对应于斯瓦尔巴-喀拉微板块与波罗的/西伯利亚克拉通碰撞形成的贝加尔造山作用早期^[14]。

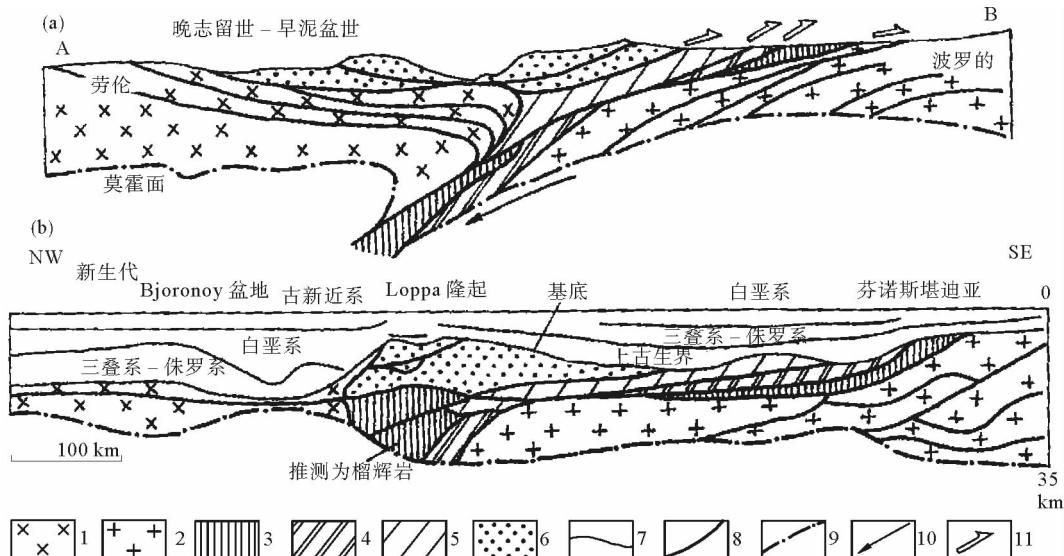
最近,对新地岛南部下奥陶统底部显著角度不整合之下变质碎屑浊积岩的研究表明,存在寒武纪的锆石^[22]。这表明,至少有一部分以前推测为新元古代的地层,实际时代为寒武纪,这样“蒂曼”不整合时代不老于晚寒武世至早奥陶世。因此,根据研究^[10],新地岛南部蒂曼造山作用持续至寒武纪末,蒂曼期的区域变形范围可能延伸超过北地群岛,进入北喀拉海域,那里的十月革命岛寒武纪与奥陶纪之间也存在不整合。

2.4 加里东造山带

加里东造山带,介于劳伦古陆与波罗的古陆之间(图2),是两个板块加里东期碰撞的产物,碰撞期始于早奥陶世,结束于中志留世—早泥盆世。主体分布于挪威的西北部与格陵兰的东北^[20],是北大西洋张开的结果。

在斯堪的纳维亚半岛,加里东造山带约300 km宽,沿挪威海近岸和陆架分布,构成东-东南倾的构造岩席,从西往东逆冲至波罗的克拉通边缘之上达数百千米。造山带中下部包括已位移的波罗的结晶基底和盖层。镁铁质岩墙从中央切穿其上部。造山带上部为古大西洋地层,由早古生代大洋蛇绿岩、火山岩及陆源的岛弧、边缘海地层组成,从化石判断,上寒武统和奥陶系主要为深水板岩,以及岛弧陆源碎屑岩和火山岩(图4)。

该造山带往北延伸主体埋于海底(图2),主要根据地球物理资料进行推测。Pease V(2011)认为,该造山带往北延伸分为两支:西北分支,位于北格陵兰与斯瓦尔巴之间;东北分支,进入巴伦支海^[29]。



(a)加里东造山期,(b)新生代,位置见图2(据文献[6]修改)

图例:1. 劳伦克拉通;2. 波罗的克拉通;3-6. 加里东造山带中的外来岩体,3. 下部;4. 中部;5. 上部;6. 顶部;7. 地层界线;8. 逆冲断层;9. 莫霍面;10. 古大西洋(Iapetus)板块俯冲方向;11. 外来岩体运动方向

图4 巴伦支海西南构造简图

Fig. 4 Schematic tectonic profile across the southwestern Batents Sea (modified after reference[6])

北极地区,对加里东造山带地壳和岩石圈认识主要来自斯瓦尔巴群岛和挪威。挪威陆地,加里东造山带基底由古元古代和太古宙结晶岩组成,包括波罗的斯堪的纳维亚裂谷边缘的外来岩体,如陆架层序、大洋和岛弧岩体以及来自劳伦大陆的外来岩体。

在斯瓦尔巴群岛,斯堪的纳维亚加里东造山带,沿斯瓦尔巴群岛西缘分布(图2)。斯匹次卑尔根岛西部发现了斯堪的亚缝合线的露头。早奥陶世出现高压变质作用,随后,至沉积志留纪砾岩之前,蓝片岩和榴辉岩经历挤压作用。外来体上部高压片麻岩席,形成于碰撞期泥盆纪砾岩沉积之前的挤压和剥露作用^[6]。碰撞的最后阶段主要由变形且局部混合岩化的新元古代准片麻岩和正片麻岩组成,随后约420 Ma受到花岗岩侵入^[30]。斯瓦尔巴西北部,构造运动后与拉伸有关的侵入花岗岩,年龄约400 Ma^[31],记录了加里东运动的结束。这些地层上覆未变形的晚志留世和泥盆纪陆源红色砾岩和砂岩沉积^[20]。

挪威以北,巴伦支海陆架区地球物理数据清楚显示,加里东主构造明显由NE走向往NW走向和斯瓦尔巴弯曲^[32],表明加里东缝合线没有延伸到东巴伦支海。值得注意的是,加里东构造在斯瓦尔巴出现N-S向走滑,表明加里东造山带向北延伸,但在斯瓦尔巴群岛之外,其延伸一直处于争议中。

2.5 乌拉尔-新地岛-泰梅尔造山带

乌拉尔-新地岛-泰梅尔造山带,代表晚古生代哈萨克斯坦和西伯利亚板块与劳鲁西亚(Laurussia)东缘的碰撞的结果,空间重力表现为明显正异常(图3)。

根据其分布及构造特征,该造山带可分3段:乌拉尔褶皱带、新地岛褶皱带和泰梅尔褶皱带。乌拉尔褶皱带呈近南北向分布,新地岛褶皱带呈弓形展布,泰梅尔褶皱带呈北东东向展布,与新地岛褶皱带之间被走滑断层错开(图2)。

2.5.1 乌拉尔造山带

乌拉尔造山带,从南部咸海至极地乌拉尔山脉,延伸超过2000 km^[33],但在北极地区小范围分布。

乌拉尔造山带南部为典型的洋壳碎块(蛇绿岩、岛弧和弧后相关的岩性),主要是中奥陶世至晚泥盆世洋-陆汇聚过程,往西逆冲至波罗的古陆东北边缘。极地乌拉尔造山带,逆冲作用仅限于晚古生代^[34],俯冲相关的高压变质作用和沿乌拉尔造山带的岩浆侵入,时代从晚泥盆世至中/晚石炭世^[35],并保存了典型的火山岛弧地球化学特征。造山后的二叠纪(290~250 Ma)岩浆作用表明,明显出现原有地壳的部分熔融^[35],且明显穿时,从南往北变年轻^[10]。

2.5.2 新地岛褶皱带

新地岛褶皱带(NZFB),介于波罗的克拉通、西伯利亚克拉通及斯瓦尔巴-喀拉微板块之间(图2),

对了解俄罗斯北极陆架西段构造历史具有重要意义^[9]。该造山带还是两大含油气省:东巴伦支与西伯利亚西北的分界,并且两省古生代含油气系统均有出露,可以直接进行研究的唯一地区。

该褶皱带基底有局部出露,由中元古代-新元古代变质碎屑岩和变质碳酸盐岩组成,受到东-西向挤压变形以及绿帘石-角闪石相和绿片岩相变质作用,还有新元古代花岗岩和花岗闪长岩的侵入^[36]。

新地岛褶皱带主要由古生代至早三叠世陆架至盆地沉积组成,其西翼主要发育陆架浅水相,总厚度超过13 km。在三叠纪-侏罗纪初严重变形,形成西倾的弓形造山带^[37]。

新地岛构造分为两段:南段(南岛)和北段(北岛),以Baidaratsky走滑断裂带为界。

新地岛西岸和东岸分别出露有裂谷期Sarychev花岗岩体和裂后期Chernogorsky花岗岩体。Sarychev岩体的花岗岩(混合岩和岩株)含有钙碱性和高钾造山期和造山后系列的成分。Chernogorsky岩体闪长岩-花岗闪长岩-花岗岩组合,由造山期和造山后有碱性与中等碱性岩浆岩组成。Sarychev岩体钾长石Ar/Ar测年为(256±2)Ma,Chernogorsky岩体花岗岩中黑云母的Ar/Ar测年为(244±0.8)Ma,表明属二叠纪造山期岩浆作用,而早三叠世的花岗岩可能属后造山期^[6]。二叠纪的造山期岩浆作用,决定了新地岛构造运动为海西期,比乌拉尔带造山运动略晚。

2.5.3 泰梅尔褶皱带

泰梅尔褶皱带,介于西伯利亚克拉通与斯瓦尔巴-喀拉微板块之间(图2),形成了晚石炭世-二叠

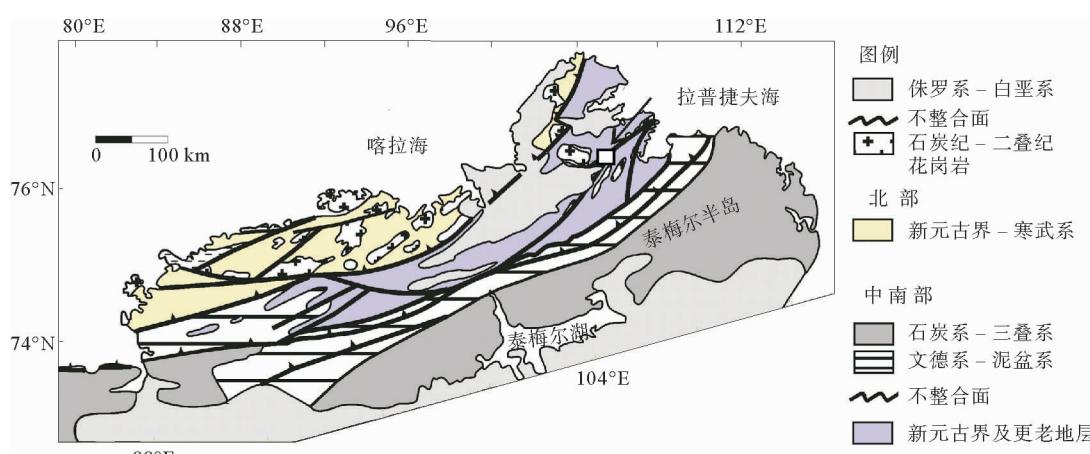
纪,以晚古生代碰撞期岩浆作用为特征,是北极关键的区域构造之一。该造山带在喀拉海沿岸可以追踪近1000 km,其南界覆盖于叶尼塞-哈坦加槽(盆地)中新生代沉积之下,北部出露于北地群岛^[23]。

北带,由新元古代-寒武纪类复理石沉积组成(图5)。其内部构造被晚古生代区域变质作用和花岗岩侵入(锆石年龄,300~265 Ma)^[19]、各种规模的逆冲断层和褶皱复杂化。北地群岛新元古代-寒武纪类复理石沉积上覆奥陶纪-泥盆纪浅水、泻湖和滨海相地层。有的认为,其基底,与新西伯利亚群岛、楚科奇半岛、苏厄德半岛、加拿大北极群岛和北格陵兰(图2)构成北极古陆^[23]。

南带,由未变质的奥陶纪-二叠纪沉积岩和晚二叠世-早三叠世火山-沉积岩组成,含溢流玄武岩以及辉绿岩岩脉和岩床。南部地层的变形强度,包括褶皱和断层,往南均增强。这些沉积岩和沉积-火山岩受到233~245 Ma的A型花岗岩和正长岩的侵入^[23]。南泰梅尔褶皱带位于晚古生代-早中生代乌拉尔-新地岛造山带与上扬斯克造山带之间。

这两带代表两个古陆的被动边缘,南带是西伯利亚大陆的被动边缘,而北带是斯瓦尔巴-喀拉微板块的陆坡沉积。

南带与北带之间的中泰梅尔增生带,主要由新元古代沉积岩和火山岩组成,包括蛇绿岩和岛弧岩浆岩套,以及格林维尔期和后格林维尔期陆壳地体组成^[10,22]。各块体之间沿逆冲断层的构造接触通常以碎裂状、糜棱状混杂岩带为标志。这些前寒武纪地层在新元古代末受到褶皱逆冲变形,上覆文德期-古生代地层。因此中泰梅尔带被看作蒂曼造山带。



北部(黄色)代表外来的喀拉地体,于石炭纪-二叠纪增生至西伯利亚;中部(紫色)是在晚新元古代增生的,此后与其南部(灰色和白色)拥有共同的地质演化历程;后来泰梅尔造山带受到中生代褶皱与逆冲的改造

图5 泰梅尔半岛构造域地质简图(引自文献[10])

Fig. 5 Simplified geological map of structural domains of the Taimyr Peninsula (after reference [10])

3 东区构造特征

东区主要包括西伯利亚克拉通及其东缘的上扬斯克造山带。

3.1 西伯利亚克拉通

西伯利亚克拉通,主要分布于俄罗斯地区,西部和西北部主要为海西期造山带,北部海西造山带中应存在蒂曼造山带,南为蒙古地体和蛇绿岩带,东北为上扬斯克(Verkhoyansk)造山带(图2)。显生宙早期,这些克拉通位于赤道以南(图6)^[38]。通常认为这些古陆是从罗迪尼亚超级大陆中分离出来的^[39]。

与波罗的克拉通的平原地貌不同,西伯利亚克拉通地貌上主要为剥蚀高地和高原,海拔平均在0.5 km以上,最高达2.5 km。其主体为位于叶尼塞河与勒拿河之间巨大的中西伯利亚高原。西伯利亚克拉通具有太古宙和古元古代变质基底,在阿纳巴尔地盾有基底出露。在勒拿河至叶尼塞河间的广大区域,基底之上覆盖很厚的新元古代和显生宙沉积^[13]。

西伯利亚克拉通具太古宙-早元古代变质基底,其西北部的阿纳巴尔地盾,出露太古宙深变质的阿纳巴尔杂岩,其不同矿物的测年结果为1850~3 000 Ma,表明经历了多期的变质作用的改造。最近对麻粒岩中的伟晶岩的测年结果为3 150 Ma,因此,推断阿纳巴尔杂岩形成时间早于3 000 Ma^[13]。

西伯利亚圈闭岩浆作用在泰梅尔地区以岩床和岩墙形式出现^[40]。花岗类岩切穿圈闭岩浆可能与它有关,其U-Pb锆石年龄约245 Ma^[14]。镁铁质和花岗岩侵入岩⁴⁰Ar/³⁹Ar冷却年龄较小,约230 Ma,解释为代表中三叠世变形后的热调整^[14,41]。圈闭岩墙和岩床与石炭纪—早三叠世陆源碎屑岩一起褶皱^[41],不整合上覆未变形松散的早侏罗世地层;因此,该变形年龄为晚三叠世。

构造上,北极的欧亚大陆东部区域包括阿纳巴(Anabr)与勒拿河之间的东西伯利亚克拉通北部、相邻的泰梅尔褶皱带及北喀拉地体。

泰梅尔褶皱逆冲带(图2)记录了石炭纪-二叠纪的挤压构造,推测与乌拉尔造山带有关,并受到中生代变形的叠加。晚古生代角闪岩到绿片岩相区域变质作用,后来叠加了同构造期(约300 Ma)的局部花岗类岩混合岩化,后者具有与俯冲有关的地球化

学特征,同造山期变形与岩浆作用,随后是造山期后(约280 Ma)未变形的深成岩,接触变质岩发育^[19]。

3.2 上扬斯克造山带

上扬斯克造山带,围绕西伯利亚克拉通东和东北缘分布(图2),形成东西伯利亚克拉通被动陆缘地层的变形。该造山带可能是西伯利亚大陆边缘在早白垩世(约130~125 Ma)与科雷马-奥莫隆复合超地体(Composite Superterrane)及阿拉斯加-楚科奇微板块碰撞过程,受到向西逆冲挤压变形的结果^[9]。该造山带从晚侏罗世开始,至白垩纪末结束,向海延伸主要依据多道地震和重力资料进行推测^[20]。

该石炭纪、二叠纪、三叠纪和侏罗纪近15 km厚的多源三角洲与陆架沉积、硬砂岩和黑色页岩层序,不整合覆盖于中元古代至古生代石英岩-碳酸盐岩之上,而在西伯利亚台地不整合覆盖于早前寒武纪基地之上。该杂岩下伏里斯期至中古生代碳酸盐岩和碎屑岩-碳酸盐岩地层,属西伯利亚克拉通边缘。

4 东北极构造演化

新元古代以来,东北极地区经历了极为复杂的构造演化,包括各种碰撞拼贴与裂解。在北极地区构造演化中最主要的事件包括:蒂曼造山作用、加里东造山作用、海西造山作用、泛大陆的裂解导致美亚海盆的张开以及北大西洋与欧亚海盆的张开等。

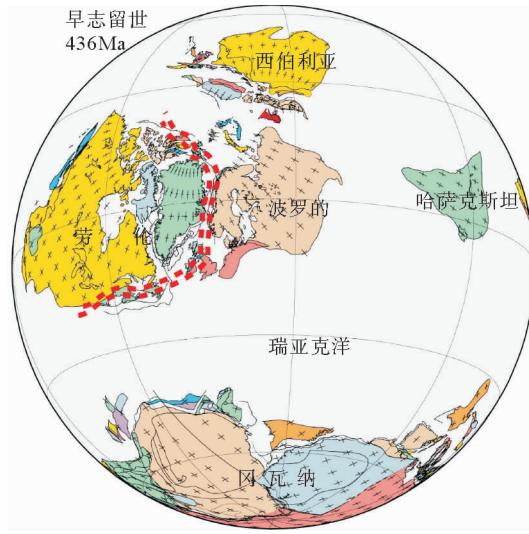
4.1 蒂曼造山期

波罗的古陆可能在文德期与斯瓦尔巴-喀拉微板块碰撞,导致蒂曼地区和原乌拉尔地区产生变形。

劳伦古陆和波罗的古陆在文德晚期从冈瓦纳分离^[42]。其裂解导致新大洋-波罗的古陆与劳亚古陆之间以及劳伦古陆与冈瓦纳之间的古大西洋、波罗的古陆与Avalonia之间的Tornquist海及西伯利亚与波罗的古陆之间的Pleionic洋诞生。此时西伯利亚与冈瓦纳(中国板块)之间还存在古亚洲洋^[43-44]。

4.2 加里东造山期

早-中奥陶世,主要地区主要板块出现重组,波罗的古陆与劳伦古陆之间的古大西洋(Iapetus洋)开始变窄。至奥陶纪末(444 Ma),劳伦与波罗的之间的古大西洋(Iapetus Ocean)开始关闭^[38]。



红色双虚线显示加里东造山带位置

图 6 436 Ma 加里东运动之初古构造图 (据文献[38]修改)

Fig. 6 Palaeotectonic map for 436 Ma at the beginning of the Caledonian Orogeny (modified after reference [38])

早志留世古大西洋的完全关闭,波罗的古陆与劳伦古陆开始碰撞(图 6),标志着斯堪的纳维亚造山运动开始,形成格陵兰与斯堪的纳维亚之间的加里东变形(图 4)。志留纪末,加里东造山作用完成,波罗的与劳伦拼贴。劳伦与波罗的合并,形成劳鲁西亚(Laurussia)古陆^[43]。

之后上地壳应力场从挤压转为拉伸,劳鲁西亚古陆东部产生拉伸机制,斯堪的纳维亚加里东构造带开始发育拉伸阶段^[44],导致泥盆纪这些地区出现裂谷和弧后盆地,形成东巴伦支海盆地和蒂曼-伯朝拉盆地^[43]。

4.3 海西造山期-乌拉尔期

晚泥盆世,哈萨克开始向西伯利亚漂移,古亚洲洋在消减。劳鲁西亚以较快的速率顺时针旋转,泥盆纪末与哈萨克斯坦岬角的首次碰撞,标志着海西运动的开始^[43]。

早石炭世,西伯利亚顺时针旋转^[45]。哈萨克继续向西伯利亚汇聚,古亚洲洋仅残留狭窄的海峡(图 7)。

哈萨克斯坦板块与劳鲁西亚古陆板块在乌拉尔中南部碰撞始于晚石炭世,之后向北部发展。乌拉尔缝合线的出现标志着泛大陆开始形成,也是海西期造山作用的重要标志。西伯利亚板块也开始在泰梅尔地区与喀拉海板块碰撞。

二叠纪末-三叠纪初,255~245 Ma 的很短时期内,西西伯利亚盆地出现与热点有关强烈的构造幕,

形成溢流玄武岩。在 10 Ma 内,玄武岩喷发达 1200000 km^3 ^[46]。

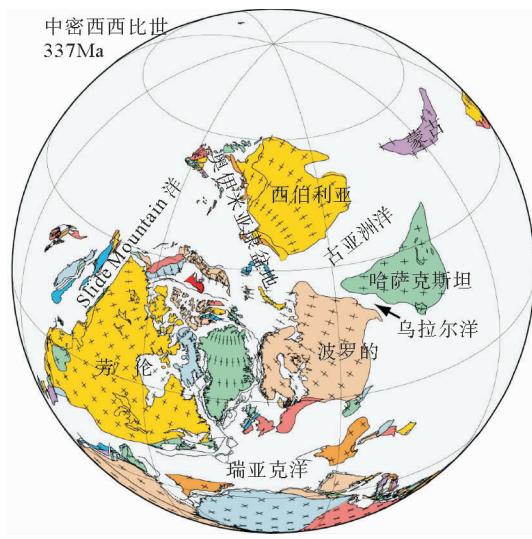


图 7 中密西西比世 337 Ma 古构造图(据文献[38]修改)

Fig. 7 Palaeotectonic map for the Middle Mississippian, 337 Ma (modified after reference [38])

4.4 中生代

在晚侏罗世,沿北美西部边缘的地体碰撞以及 Anvil 洋的关闭,标志着在北阿拉斯加布鲁克斯外来体俯冲的开始。

早白垩世上扬斯克(科累马-鄂霍次克-切尔斯基)超地体随北亚洲克拉通增生^[47]。增生的时间从侏罗世末到纽康姆阶晚期。南 Anui 洋在 130~120 Ma 关闭。

北阿拉斯加地体与南阿拉斯加地体碰撞。同时楚科奇板块与上扬斯克(科累马-鄂霍次克)超地体碰撞,此时后者已是西伯利亚板块的一部分。在阿尔布期至晚白垩世,鄂霍次克-楚科奇火山-侵入岩带成为此时亚洲活动边缘的标志^[48]。

5 结论

欧亚北极地区西部,区域地质构造复杂,根据其构造特征,以乌拉尔-新地岛-泰梅尔造山带为界,可以分为东、西两区。西区主要构造单元包括前寒武纪的波罗的克拉通与斯瓦尔巴微板块以及蒂曼造山带、加里东造山带和乌拉尔-新地岛造山带等,而东区主要包括西伯利亚克拉通及上扬斯克造山带。

该区主要经历了 4 次大的构造事件:

(1)新元古代至早寒武世的蒂曼造山运动,使得

波罗的古陆与斯瓦尔巴-喀拉微板块碰撞造山。

(2)早古生代,奥陶纪-志留纪的加里东造山运动,使北极地区两大克拉通:波罗的与劳伦碰撞造山,形成加里东造山带,并形成劳鲁西亚古陆。造山作用停止后,地壳出现拉伸,形成东巴伦支海盆地和地幔-伯朝拉盆地。

(3)晚古生代,随着哈萨克斯坦板块与波罗的古陆与西伯利亚古陆的碰撞,形成乌拉尔-新地岛-泰梅尔造山带。二叠纪末—三叠纪初,西伯利亚可能经过地幔柱,形成大量的溢流玄武岩,也表明在晚古生代造山期之后,地壳以拉伸为主的特征。

(4)早白垩世,伴随着科雷马-奥莫隆复合超地体及阿拉斯加-楚科塔微板块与西伯利亚大陆边缘碰撞拼贴,形成上扬斯克造山带和南阿纽伊缝合线。

参考文献 (References)

- [1] U S. Geological Survey. Circum-Arctic Resource Appraisal (north of the Arctic Circle) assessment units GIS data [R]. 2009, <http://energy.usgs.gov/arctic/>.
- [2] Gautier D L, Bird K J, Charpentier R R, et al. Assessment of Undiscovered Oil and Gas in the Arctic [J]. Science, 2009, 324: 1175-1179.
- [3] Kaminshtii A E, Epov M I, Burshtein L M. Geology and hydrocarbon resources of the continental shelf in Russian Arctic seas and the prospects of their development [J]. Russian Geology and Geophysics, 2010, 51: 3-11.
- [4] Kaminshtii V D, Suprunenko O I, Suslova V V. The continental shelf of the Russian Arctic region: the state of the art in the study and exploration of oil and gas resources [J]. Russian Geology and Geophysics, 2011, 52: 760-767.
- [5] 李学杰,姚永坚,杨楚鹏,等. 北极区域地质与油气资源 [M]. 北京:地质出版社,2014. [LI Xuejie, YAO Yongjian, YANG Chupeng, et al. Regional Geology and Petroleum Resources [M]. Beijing: Geological Press, 2014.]
- [6] Filatova N I, Khain V E. The Arctida Craton and Neoproterozoic-Mesozoic Orogenic Belts of the Circum-Polar Region [J]. Geotektonika, 2010, 44(3): 203-227.
- [7] 李学杰,万玲,万荣胜,等. 北冰洋地质构造及其演化 [J]. 极地研究,2010,22(3): 271-285. [LI Xuejie, WAN Ling, WAN Rongsheng, et al. The structure and tectonic revolution of Arctic Ocean [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2010, 22(3): 271-285.]
- [8] 李学杰,姚永坚,杨楚鹏,等. 北极地区地质构造及主要构造事件 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版,2015,42(2): 335-348. [LI Xuejie, YAO Yongjian, YANG Chupeng, et al. Tectonic Features and Main Tectonic Events in the Arctic Area [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2015, 45(2): 335-348.]
- [9] Drachev S S, Malyshev N A, Nikishin A M. Tectonic history and petroleum geology of the Russian Arctic Shelves: an overview [C]//Vinnig B A, Pickering S C (eds). Petroleum Geology: From Mature Basins to New Frontiers - Proceedings of the 7th Petroleum Geology Conference, 2010, 591-619. DOI: 10.1144/0070591.
- [10] Pease V. Eurasian orogens and Arctic tectonics: an overview [C]//In: Spencer A M, Embry A F, Gautier D L, et al. (eds) Arctic Petroleum Geology. Geological Society, London, Memoirs, 2011, 35: 311-324.
- [11] Kenyon S, Forsberg R, Coakley B. New gravity field for the Arctic [J]. EOS, 2008, 89: 1-2.
- [12] Maus S, Sazonova T, Hemant K, et al. National Geophysical Data Center candidate for the World Digital Magnetic Anomaly Map [C]. Geochem. Geophys. Geosyst., 2007, 8, Q06017, doi: 10.1029/2007GC001643.
- [13] 陈正, E. E. 米兰诺夫斯基. 俄罗斯及其毗邻地区地质 [M]. 北京: 地质出版社, 2010. [CHEN Zheng (translation), Милановский Е Е (ed.). Geology of Russia and Its Adjacent Region [M]. Beijing: Geological Press, 2010.]
- [14] Vernikovsky V A, Dobretsov N L, Metelkin D V, et al. Concerning tectonics and the tectonic evolution of the Arctic [J]. Russian Geology and Geophysics, 2013, 54: 838-858.
- [15] Metelkina D V, Vernikovsky V A, Matushkin N Yu. Arctida between Rodinia and Pangea [J]. Precambrian Research, 2014, <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2014.09.013>.
- [16] Gee D G, Pease V (eds). The Neoproterozoic Timanide Orogen of Eastern Baltica [M]. Geological Society, London, 2004, Memoirs, 30.
- [17] Lorenz H, Gee D G, Whitehouse M J. New geochronologic data on Palaeozoic igneous activity and deformation in the Severnaya Zemlya Archipelago, Russia and implications for the development of the Eurasian Arctic margin [J]. Geological Magazine, 2007, 144: 105-125.
- [18] Lorenz H, Gee D G, Simonetti A. Detrital zircon ages and provenance of the Late Neoproterozoic and Palaeozoic successions on Severnaya Zemlya, Kara Shelf: a tie to Baltica [J]. Norwegian Journal of Geology, 2008, 88: 235-258.
- [19] Vernikovsky V, Neimark L, Ponomarchuk V, et al. Geochemistry and age of collision granitoids and metamorphites of the Kara microcontinent (northern Taimyr) [J]. Russian Geology and Geophysics, 1995, 36: 46-60.
- [20] Pease V, Drachev S, Stephenson R, et al. Arctic lithosphere — A review [J]. Tectonophysics, 2014, 628: 1-25.
- [21] Vernikovsky V A, Vernikovskaya A E, Chernykh A I, et al. Petrology and geochemistry of Taimyr Riphean ophiolites [J]. Russian Geology and Geophysics, 1996, 36: 103-120.
- [22] Pease V, Scott R A. Crustal affinities in the Arctic Uralides, northern Russia: significance of detrital zircon ages from Neoproterozoic and Paleozoic sediments in Novaya Zemlya and Taimyr [J]. Journal of the Geological Society, 2009, 166: 517-527.
- [23] Vernikovsky V A, Vernikovskaya A E. Central Taimyr ac-

- cretionary belt (Arctia Asia): Meso-Neoproterozoic tectonic evolution and Rodinia breakup [J]. *Precambrian Research*, 2001, 110: 127-141.
- [24] Larionov A N, Andreichev V A, Gee D G. The Vendian Alkaline Igneous Suite of Northern Timan: Ion Microprobe U-Pb Zircon Ages of Gabbros and Syenite [J]. *Geol. Soc. London Mem.*, 2004, 30: 69-74.
- [25] Kos'ko M K, Cecile M P, Harrison J C, et al. Geology of Wrangel Island, Between Chukchi and East Siberian Seas, Northeastern Russia [R]. Geological Survey of Canada, Ottawa, 1993: 461.
- [26] Puchkov V N, Structure and Geodynamics of the Uralian Orogen [C]//In: Burg J P, Ford M (eds). *Orogeny Through Time*. Geological Society, London, Special Publications, 1997, 121: 201-234.
- [27] Lorenz H, Pystin A M, Olovyanishnikov V G, et al. Neoproterozoic high-grade metamorphism of the Kanin Peninsula, Timanide Orogen, northern Russia [C]//In: Gee D G, Pease V (eds). *The Neoproterozoic Timanide Orogen of Eastern Baltica*. Geological Society, London, Memoirs, 2004, 30: 59-68.
- [28] Ritzmann O, Faleide J I. The Caledonian basement of the western Barents Sea [J]. *Tectonics*, 2007, 26, TC5014, doi: 10.1029/2006TC002059.
- [29] Gudlaugsson S T, Faleide J I, Johnansen S E, et al. Late Palaeozoic structural development of the South-western Barents Sea [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 1988, 15: 73-102.
- [30] Pettersson C H, Tebenkov A M, Larionov A N, et al. Timing of migmatization and granite genesis in the Northwestern Terrane of Svalbard, Norway: implications for regional correlations in the Arctic Caledonides [J]. *Journal of the Geological Society*, 2009, 166: 147-158.
- [31] Myhre P I, Corfu F, Andresen A. Caledonian anatexis of Grenvillian basement and cover: a U/Pb study of Albert I Land, NW Svalbard [J]. *Norwegian Journal of Geology*, 2009, 89: 173-191.
- [32] Marello L, Ebbing J, Gernigon L. Magnetic basement study in the Barents Sea from inversion and forward modeling [J]. *Tectonophysics*, 2010, 493: 153-171.
- [33] O'Leary N, White N, Tull S, et al. Evolution of the Timan-Pechora and South Barents Sea basins [J]. *Geological Magazine*, 2004, 141: 141-160.
- [34] Scarrow J, Pease V, Fleutelot C, et al. The late Neoproterozoic Enganepo ophiolite, Polar Urals, Russia: an extension of the Cadomian arc? [J]. *Precambrian Research*, 2002, 110: 255-275.
- [35] Bea F, Fershtater G, Montero P. Granitoids of the Uralides: implications for the evolution of the orogen [J]. *Geophys. Monogr. Ser.*, 2002, 132: 211-232.
- [36] Korago E A, Kovaleva G N, Lopatin B G, et al. The Precambrian Rocks of Novaya Zemlya [J]. *Geol. Soc. London Mem.*, 2004, 30: 135-143.
- [37] Scott R A, Howard J P, Guo L, et al. Offset and curvature of the Novaya Zemlya fold-and-thrust belt, Arctic Russia [C]//In: Vining B A, Pickering S C (eds). *Petroleum Geology: From Mature Basins to New Frontiers - Proceedings of the 7th Petroleum Geology Conference*. Geological Society, London, 2010: 645-647.
- [38] Lawver L A, Gahagan L M, Norton I. Palaeogeographic and tectonic evolution of the Arctic region during the Palaeozoic [C]//In: Spencer A M, Embry A F, Gautier D L, et al. (eds). *Arctic Petroleum Geology*. Geological Society, London, Memoirs, 2011, 35: 61-77.
- [39] Lawver L A, Grantz A, Gahagan L M. Plate Kinematic Evolution of the Present Arctic Region since the Ordovician [C]//In: Miller E L, Grantz A, Klemperer S L (eds). *Tectonic Evolution of the Bering Shelf-Chukchi Sea-Arctic Margin and Adjacent Landmasses*. *Geol. Soc. America*, Boulder, 2002: 333-358.
- [40] Dobretsov N L, Vernikovsky V A, Karyakin Yu V, et al. Mesozoic-Cenozoic volcanism and geodynamic events in the Central and Eastern Arctic [J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, 54: 874-887.
- [41] Walderhaug H, Eide E, Scott R, et al. Palaeomagnetism and 40Ar/39Ar geochronology from the South Taimyr igneous complex, Arctic Russia: a Middle-Late Triassic magmatic pulse after Siberian flood-basalt volcanism [J]. *Geophys. J. Int.*, 2005, 163: 501-517.
- [42] Torsvik T H, Smethurst M A, Meert J G, et al. Continental break-up and collision in the Neoproterozoic and Palaeozoic: a tale of Baltica and Laurentia [J]. *Earth-Science Reviews*, 1996, 40: 229-258.
- [43] Golonka J, Bocharova N Y, Ford D, et al. Paleogeographic reconstruction and basins development of the Arctic [J]. *Marine and Petroleum*, 2003, 20: 211-248.
- [44] Schlindwein V, Jokat W. Post-collisional extension of the East Greenland Caledonites: a geophysical perspective [J]. *Geophysical Journal International*, 2000, 140: 559-567.
- [45] Smethurst M A, Khrabov A N, Torsvik T H. The Neoproterozoic and Palaeozoic palaeomagnetic data for the Siberian Platform: from Rodinia to Pangea [J]. *Earth-Science Reviews*, 1998, 43: 1-24.
- [46] Golonka J. Phanerozoic palaeoenvironment and palaeolithofacies maps of the Arctic region [C]//In: Spencer A M, Embry A F, Gautier D L, et al. (eds). *Arctic Petroleum Geology*. Geological Society, London, Memoirs, 2011, 35: 79-129.
- [47] Parfenov L M, Natapov L M, Sokolov S D, et al. Terranes and accretionary tectonics of Northeastern Asia [J]. *Tectonophysics*, 1993, 27: 62-72.
- [48] Tikhomirov P L, Kalinina A, Moriguti T, et al. The Cretaceous Okhotsk-Chukotka Volcanic Belt (NE Russia): Geology, geochronology, magma output rates, and implications on the genesis of silicic LIPs [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2012, 221-222: 14-32.

REGIONAL GEOLOGY AND TECTONIC EVOLUTION OF THE WESTERN EUROASIAN ARCTIC

LI Xuejie¹, YAO Yongjian¹, YANG Chupeng¹, CHEN Zhenlin², WANG Jun¹, ZHU Song¹, LI Bo¹

(1. Guangzhou Marine Geological Survey, Key Laboratory of Marine Mineral Resources, MLR, Guangzhou 510760, China;

2. School of Mineral Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: The western Euroasian Arctic area is located in the large area from the east coast of the North Atlantic in the west to Verkhoyansk Mountains in the east. It is quite complicated in geology. According to the basic geological features, it could be divided to two provinces, say western province and eastern province. In the western province, there are various tectonic units, such as the Precambrian Baltica craton, Siberian craton and Svalbard microplate surrounded by the Timanian, Caledonian and Uralian Orogenes, while in the eastern area there occur the Siberian craton and Early Cretaceous Verkhoyansk Orogen. It has experienced four major tectonic events: 1) the Timanian orogeny by the latest Neoproterozoic to earliest Cambrian resulted in the collision between Svalbard-Kara microplate and Baltic, and the Timanide was formed; 2) the Caledonian orogeny from Ordovician to Silurian resulted in the Baltic colliding with Siberia, and formed the Caledonite. 3) The collision of Siberia with Kazakhstan and Baltic in late Palaeozoic resulted in the Ural-Novaya Zemlya-Taimy Orogen. 4) The collision of the Kolyma-Omolon Composite Superterrane and Alaska-Chukota microplate with the continental margin of Siberia, resulted in the formation of the Verkhoyansk Orogen and South Anyui Suture.

Key words: regional geology; tectonic evolution; Euroasian Arctic