



## 华北板块北缘东段库伦杂岩的发现及其构造意义

李东涛<sup>1</sup>, 刘锦<sup>2</sup>, 陈井胜<sup>1</sup>, 赵辰<sup>1</sup>, 李玉超<sup>3</sup>, 彭游博<sup>3</sup>,  
蒯兵<sup>3</sup>, 杨仲杰<sup>3</sup>, 刘文彬<sup>3</sup>

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心(东北地质科技创新中心), 辽宁 沈阳 110034;
2. 吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130021; 3. 辽宁省地质矿产调查院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110031

**摘要:** 在华北板块北缘东段辽宁与内蒙古交界的库伦旗地区新发现了以晚古生代变质火山岩为主体的库伦杂岩。通过剖面测制, 确定库伦杂岩岩石组合包括凝灰岩、安山岩及变沉积岩。凝灰岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测试结果为  $391.0 \pm 3.7$  Ma, 确定库伦杂岩形成时代为中泥盆世。地球化学特征显示库伦杂岩形成于晚期岛弧环境。通过对新发现的中泥盆世库伦杂岩及相关古生代的沉积事件、岩浆事件及变形的研究, 结合本区古生代杂岩、岩浆岩及火山沉积地层研究成果, 建立了华北板块北缘东段古生代增生型造山带的构造演化过程, 其经历了志留纪活动大陆边缘阶段、泥盆纪弧-陆碰撞阶段、石炭纪一中二叠世活动大陆边缘阶段和晚二叠世碰撞造山阶段。志留系方家屯岩组、西别河岩组形成于弧后盆地环境, 反映了奥陶纪-志留纪研究区处于活动大陆边缘环境; 泥盆纪库伦杂岩火山-沉积为弧-陆碰撞结果, 伴随伸展背景下的岩浆活动。石炭纪一中二叠世研究区在碰撞后伸展背景下重新拉张, 接受了白家店岩组、酒局子岩组沉积并导致了佟家屯岩组火山岛弧的形成。晚二叠世古亚洲洋闭合, 发生陆-陆碰撞, 后造山作用延续到三叠纪。

**关键词:** 库伦杂岩; 增生型造山带; 兴蒙造山带; 华北板块; 古生代; 构造演化

## DISCOVERY OF KULUN COMPLEX IN THE EAST PART OF THE NORTHERN MARGIN OF NORTH CHINA PLATE: Tectonic Implication

LI Dong-tao<sup>1</sup>, LIU Jin<sup>2</sup>, CHEN Jing-sheng<sup>1</sup>, ZHAO Chen<sup>1</sup>, LI Yu-chao<sup>3</sup>, PENG You-bo<sup>3</sup>,  
KUAI Bing<sup>3</sup>, YANG Zhong-jie<sup>3</sup>, LIU Wen-bin<sup>3</sup>

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China; 2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130021, China;
3. Liaoning Geological and Mineral Survey Institute Co., Ltd., Shenyang 110031, China

**Abstract:** The Kulun complex, mainly composed of Late Paleozoic meta-volcanic rocks, has been newly discovered in Kulun Qi area on the border between Liaoning and Inner Mongolia in the east part of the northern margin of North China Plate. The profile survey confirms the rock association of Kulun complex including tuff, andesite and metasedimentary rock. The zircon LA-ICP-MS U-Pb isotope test for the tuff shows  $391.0 \pm 3.7$  Ma, indicating the formation age of Middle Devonian. The geochemical characteristics show that the complex was formed in later island arc environment. The

收稿日期: 2022-07-17; 修回日期: 2023-03-06. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局项目“东北地区区域基础地质调查”(DD20221632); “辽东-吉中地区区域地质调查”(DD20190042); “松辽盆地西缘扎赉特-巴林左旗区域地质调查”(DD20190039).

作者简介: 李东涛(1966—)男, 正高级工程师, 从事区域地质矿产调查工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河大街 280 号, E-mail//1352339345@qq.com

通信作者: 陈井胜(1983—)男, 正高级工程师, 从事区域地质调查工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河大街 280 号, E-mail/5202268@qq.com

tectonic evolution process of the Paleozoic accretionary orogenic belt in the east part of the northern margin of North China Plate is established through the study of the newly discovered Middle Devonian Kulun complex and related Paleozoic sedimentary events, magmatic events and deformation, combined with the research results of the Paleozoic complex, magmatic rocks and volcanic sedimentary strata in the area. The orogenic belt has experienced the Silurian active continental margin stage, Devonian arc-continental collision stage, Carboniferous-Middle Permian active continental margin stage and Late Permian collision orogenic stage. The Silurian Fangjiatun and Xibiehe rock formations were formed in the back-arc basin environment, indicating the study area was in the active continental margin environment during the Ordovician-Silurian. The volcano-sedimentation of the Devonian Kulun complex is the result of arc-continent collision, accompanied by magmatic activity under extensional background. The study area underwent pull-apart again under the post-collision extension background, and received the deposits of Baijiadian rock formation and Jiujuzi rock formation in the Carboniferous-Middle Permian, leading to the formation of the volcanic island arc of Tongjiatun rock formation. In the Late Permian, continent-continent collision occurred with the closure of Paleo-Asian Ocean, and the post-orogenic continued to the Triassic.

**Key words:** Kulun complex; accretionary orogenic belt; Xing'an-Mongolian orogenic belt; North China Plate; Paleozoic; tectonic evolution

## 0 引言

华北板块北缘东段在古生代处于古亚洲洋裂解—扩展—消亡和同华北板块俯冲—碰撞对接构造演化阶段<sup>[1]</sup>。华北板块自中元古代末成为 Rodinia 超大陆的一部分,完成第一次陆缘增生过程后,在 800~700 Ma, Rodinia 超大陆开始发生裂解,新的大洋(古亚洲洋)开始形成。随着古亚洲洋洋脊的扩张,洋壳向华北板块俯冲,沿华北板块北缘(西拉木伦断裂及其延伸线)形成一条近东西向的古俯冲带。从震旦纪末至寒武纪,古亚洲洋处于扩张期,此扩张带大致沿温都尔庙—西拉木伦河—磐石—桦甸—龙孟山—海参崴一线延伸,这也是曾经浩瀚的古大洋洋壳的残余分布线。

近 10 年来,越来越多数据表明古亚洲洋最终沿索伦—西拉木伦—长春—延吉一线闭合,这是一条延长 1 500 km 以上的古生代缝合带,其分割了华北板块与北部诸多地块,是汇聚大陆边缘上岩浆和构造活动最剧烈的构造带,其形成和演化过程一直是当前地球科学最关注的主题之一<sup>[2-9]</sup>。前人研究成果多集中于此带西部及东段,在此带东部内蒙古与辽宁接触地区仍然缺少新的古生代岩石地层记录与证据,致使此带缺少了关键的中部连接点。

2010~2012 年和 2016~2018 年,笔者通过区域地质调查分别在内蒙古自治区库伦旗地区新发现了以晚古生代变质火山岩为主体的库伦杂岩,在辽宁省北部

法库方家屯地区新发现了早古生代花岗质岩体和变质火山岩石地层(图 1),并进一步通过岩相学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学以及锆石原位 Hf 同位素的分析研究,对其源区性质及构造背景进行了探讨。华北板块北缘东段古生界划分为志留系、泥盆系、石炭系和二叠系,主要分布于研究区北部内蒙古白音花—奈林皋、辽宁阜新北部彰武到法库一带。其受构造断裂控制,分布不连续,呈残片形式存在,局部变质变形现象强烈,剖面中多未见顶底。通过对其岩性、岩相、岩石地球化学及构造研究,表明在华北板块北缘东段存在着志留纪弧后盆地沉积、泥盆纪岛弧沉积、石炭纪裂陷槽沉积及二叠纪岛弧沉积(表 1),填补了索伦—西拉木伦—长春—延吉古亚洲洋缝合带中部古生代构造演化证据重要一环。

## 1 中泥盆世库伦杂岩特征

### 1.1 库伦杂岩的宏观岩石构造特征

中泥盆世库伦杂岩(D<sub>kl</sub>)出露于内蒙古库伦旗北部(图 1),岩石类型主要为青灰色变质英安质晶屑岩屑凝灰岩、安山岩、灰白色绿帘变质泥岩、钙质泥岩、灰黑色碳质绢云泥质板岩等,构造叠置厚度大于 233.2 m。由于第四系掩盖严重,仅在库伦东北部一处浅坑处发现与中侏罗世二长花岗岩的侵入接触关系,局部碳酸盐含量增高,有夕卡岩及铜矿化出现,被中基性脉岩侵

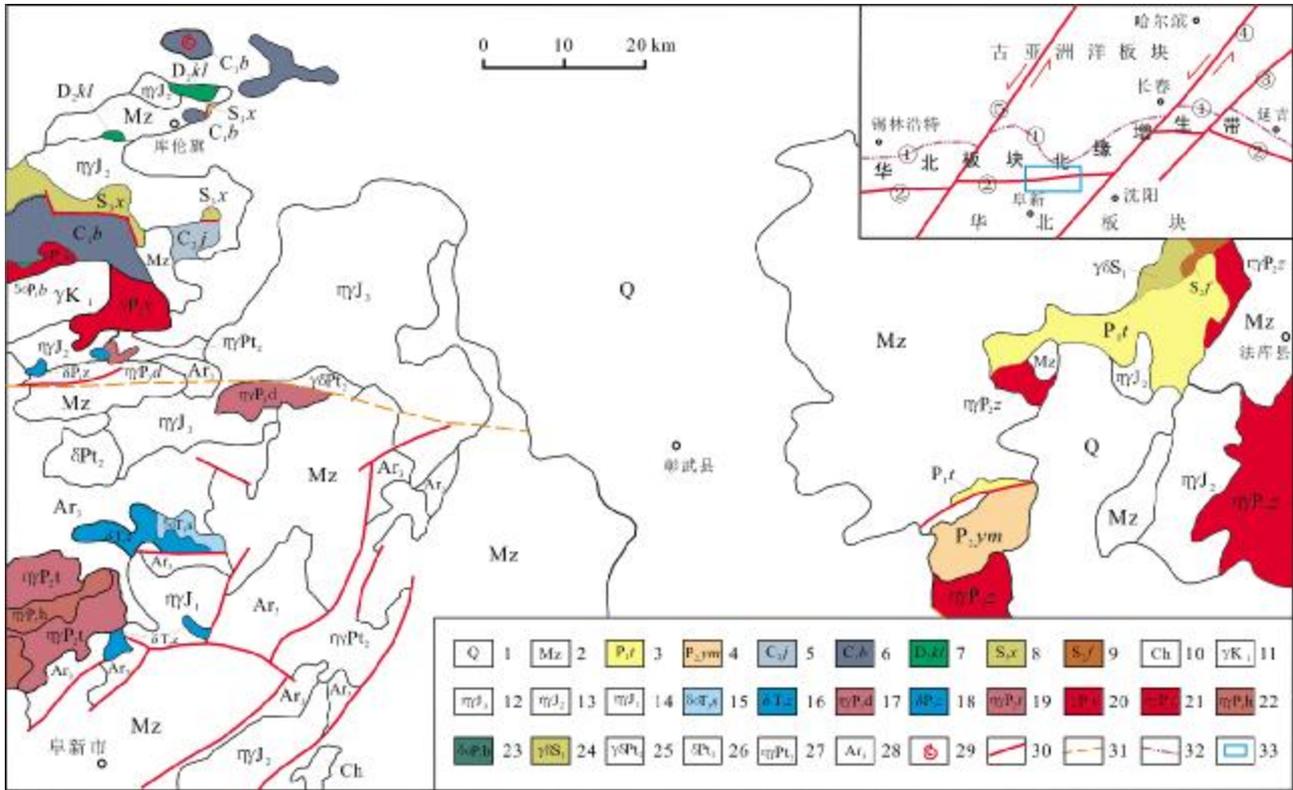


图 1 研究区大地构造位置<sup>[2]</sup>及地质略图

Fig. 1 Tectonic location and geological sketch map of the study area

1—第四系 (Quaternary); 2—中生代地层 (Mesozoic strata); 3—早二叠世佟家屯岩组 (Early Permian Tongjiatun rock fm.); 4—晚二叠世叶茂台岩组 (Late Permian Yemaotai rock fm.); 5—上石炭统酒局子组 (Upper Carboniferous Jiujuzi fm.); 6—下石炭统白家店组 (Lower Carboniferous Baijiadian fm.); 7—中泥盆世库伦杂岩 (Middle Devonian Kulun complex); 8—晚志留世西别河岩组 (Late Silurian Xibiehe rock fm.); 9—中志留世方家屯岩组 (Middle Silurian Fangjiatun rock fm.); 10—长城系 (Changchengian); 11—早白垩世花岗岩 (Early Cretaceous granite); 12—晚侏罗世花岗岩 (Late Jurassic granite); 13—中侏罗世花岗岩 (Middle Jurassic granite); 14—早侏罗世花岗岩 (Early Jurassic granite); 15—晚三叠世石英闪长岩 (石场) (Late Triassic Shichang quartz diorite); 16—晚三叠世闪长岩 (扎兰营子) (Late Triassic Zhalanyingzi diorite); 17—晚二叠世二长花岗岩 (大三麻子) (Late Permian Dasanmazi monzogranite); 18—晚二叠世闪长岩 (张大坝) (Late Permian Zhangdaba diorite); 19—中二叠世二长花岗岩 (田家窝铺) (Middle Permian Tianjiawopu monzogranite); 20—中二叠世花岗岩 (下库里吐) (Middle Permian Xiakulitu granite); 21—中二叠世二长花岗岩 (大赵贝) (Middle Permian Dazhaobei monzogranite); 22—早二叠世二长花岗岩 (好四家子) (Early Permian Haosijiazi monzogranite); 23—早二叠世石英闪长岩 (不可金) (Early Permian Bukejin quartz diorite); 24—早志留世花岗闪长岩 (Early Silurian granodiorite); 25—中元古代花岗闪长岩 (Mesoproterozoic granodiorite); 26—中元古代闪长岩 (Mesoproterozoic diorite); 27—中元古代二长花岗岩 (Mesoproterozoic monzogranite); 28—太古宙结晶基底 (Archean crystalline basement); 29—化石采集点 (fossil sampling point); 30—断层 (fault); 31—构造单元界线 (tectonic boundary); 32—板块边界 (plate boundary); 33—研究区范围 (study area); ①西拉木伦-延吉断裂 (Xar Moron River-Yanji fault); ②赤峰-开原断裂 (Chifeng-Kaiyuan fault); ③敦化-密山断裂 (Dunhua-Mishan fault); ④依兰-伊通断裂 (Yilan-Yitong fault); ⑤嫩江-开鲁断裂 (Nenjiang-Kailu fault)

入. 杂岩内部沉积岩主要为泥岩, 反映了较深的水环境, 其内夹有变质安山岩及凝灰岩, 其中凝灰岩多与泥岩互层, 形成多个凝灰岩-泥岩-凝灰岩的沉积旋回, 表明形成时火山活动的频发 (图 2). 库伦杂岩产状陡倾, 倾角多为 70~80°, 推测造成此现象的原因为洋壳俯冲过程的掀斜作用, 这也与晚志留世华北板块北缘发生弧-陆碰撞这一构造背景相吻合. 库伦杂岩内既

发育有中深层次的韧性剪切作用, 又有浅层次的脆性破碎, 且多发生绿片岩相变质作用. 这些特征均表明了该套地层经历了复杂强烈的构造运动.

代表剖面: 通辽市库伦旗采石场中泥盆世库伦杂岩剖面 (图 2).

库伦杂岩 (D<sub>2</sub>M): >233.2 m  
43. 灰黑色绿帘变质泥岩 9.3 m

表 1 内蒙古自治区库伦旗-辽宁省彰武法库地区古生界构造岩石地层单位一览表  
Table 1 Paleozoic stratigraphy of Kulun Qi of Inner Mongolia and Faku of Liaoning areas

系	统	组	符号	厚度/m	岩性特征	同位素年龄/Ma	生物组合
二叠系	中统	叶茂台岩组	P <sub>2</sub> ym	>512	绢云绿泥片岩、绢云泥质板岩、变质粉砂岩	268±3	
	下统	佟家屯岩组	P <sub>1</sub> t	1052.08	深灰色含斜长石榴绿泥绿帘绢云石英质糜棱岩、绿灰色绢云绿泥石英绿帘质糜棱岩、灰色绢云绿泥绿帘石英斜长质糜棱岩、深灰色石英绿泥绿帘斜长质糜棱岩及安山质糜棱岩	292±2	
石炭系	上统	酒局子组	C <sub>2</sub> j	>1776.14	黑色板岩、片岩、含砾石英岩屑杂砂岩、薄层灰岩		Calamites sp., Neuropteris cf. Pseudovata Gothan et Sze, Pecopteris cf. wongii, P. cf. arborescens, Lepidodendron tachingshancnsis, L. szeianum, Tingiac arbonica
	下统	白家店组	C <sub>1</sub> b	>3947.6	碳质钙质页岩、大理岩、变质砂岩、灰色结晶灰岩、片岩及生物碎屑灰岩		Dibunophyllum bipatitum (Mcoy), D. cf. hochanpingense Yu, Lithostroton cf. irregulare Phillips, Giantoproductus manchuriensis (Minato), G. edelburgensis (Phillips)等
泥盆系	中统	库伦杂岩	D <sub>2</sub> kl	>233	灰色铁质炭质泥岩、浅紫红色钙质泥岩、灰色绿帘石化泥岩、灰色绿帘石化硅质泥岩	391.0±3.7	本次获得
志留系	上统	西别河岩组	S <sub>3</sub> x	1044.7	灰白色大理岩夹斜长角闪岩、二长浅粒岩及石英二云片岩	>380	Amplexus xiashibeianse GUO, Diplochone sp., Tabularia sp., Thamnopora (Paralhamnopora) yu Tchi, Clathrodictyon cystosiforme khalfiua 等
	中统	方家屯岩组	S <sub>2</sub> f	>464	灰绿色透辉透闪片岩、灰绿色黑云斜长变粒岩、灰绿色绿帘绿泥片岩、灰黄色石英闪长质糜棱岩	433.4±4.2	

42.灰黑色硅化凝灰岩	5.1 m	25.暗灰褐色绿帘斜黝帘蚀变岩	2 m
41.深灰色绿帘变质泥岩夹碳质绢云泥质板岩	11.1 m	24.青灰色钙质泥岩	1 m
40.灰紫色绿帘斜黝帘蚀变岩	1.6 m	23.灰黑色绿帘变质泥岩	7 m
39.深灰色绿帘变质泥岩	0.8 m	22.灰黑色碳质绢云泥质板岩与绿帘变质泥岩互层	7 m
38.青灰色碳质绢云泥质板岩	3.7 m	21.灰白色变质晶屑岩屑凝灰岩	7.7 m
37.灰黑色变质安山质岩屑凝灰岩	2.8 m	20.灰黑色含碳质千枚状板岩	10.5 m
36.灰黑色碳质绢云泥质板岩	0.9 m	19.浅灰色变质英安质熔结凝灰岩	2.9 m
35.青灰色变质英安质晶屑岩屑凝灰岩	8.4 m	18.深灰色变质英安质岩屑晶屑凝灰岩	2.8 m
34.灰黑色绿帘变质泥岩	5.6 m	17.浅灰色绿帘变质泥岩	10.9 m
33.黄绿色蚀变火山角砾岩	1.9 m	16.灰黑色黑云母安山岩	2.7 m
32.灰黑色碳质绢云泥质板岩	1.9 m	15.灰黑色绢云泥质板岩	3.8 m
31.黄绿色绿帘变质泥岩	1.9 m	14.灰黑色绿帘变质含粉砂质泥岩	1.9 m
30.灰黑色碳质绢云泥质板岩	8.4 m	13.灰色硅化凝灰岩	2.9 m
29.黄绿色绿帘变质泥岩	23.2 m	12.灰黑色绢云泥质板岩	1 m
28.墨绿色变质英安质晶屑岩屑凝灰岩熔岩	4.7 m	11.浅黄色硅化凝灰岩	12.5 m
27.灰白色绿帘变质泥岩	1.9 m	10.深灰色绢云碳质板岩	2.9 m
26.灰黑色变质英安质晶屑岩屑凝灰岩	32.1 m	9.灰绿色绢云母化凝灰岩	1.9 m

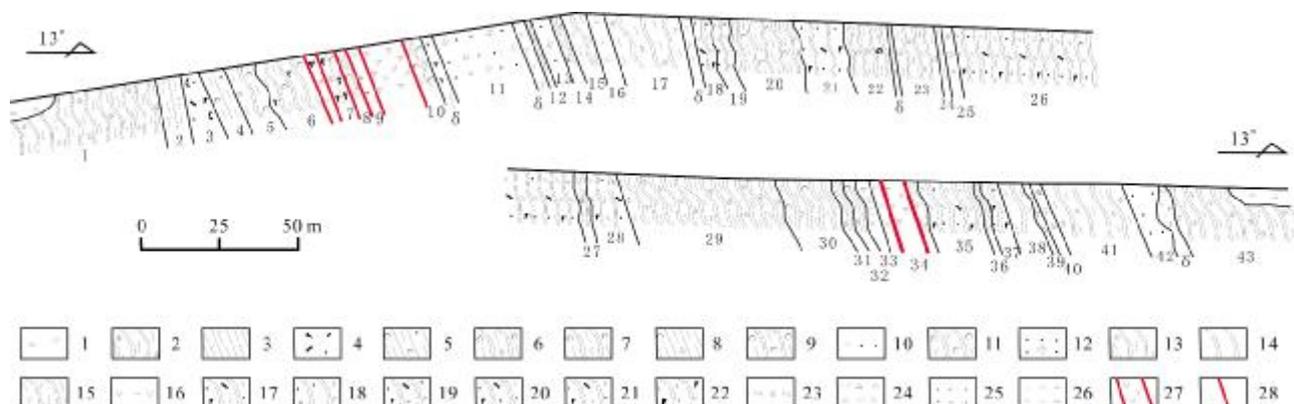


图 2 通辽市库伦旗采石场泥盆纪库伦杂岩实测剖面图

Fig. 2 Section of Devonian Kulun complex at the Kulun Qi quarry in Tongliao City

1—第四系(Quaternary); 2—绿帘变质泥岩(epidote meta mudstone); 3—钙质泥岩(calcareous mudstone); 4—流纹质晶屑岩屑凝灰岩(rhyolitic crystal lithic tuff); 5—含粉砂质碳质泥岩(silty carbonaceous mudstone); 6—绿帘变质碳质泥岩(epidote meta carbonaceous mudstone); 7—碳质绢云泥质板岩(carbonaceous sericite argillaceous slate); 8—碳质绿帘硅质岩(carbonaceous epidote siliceous rock); 9—碳质绢云泥质板岩(carbonaceous sericite argillaceous slate); 10—绢云母化凝灰岩(sericitized tuff); 11—绢云母碳质板岩(sericite carbonaceous slate); 12—硅化凝灰岩(silicified tuff); 13—绿帘变质含粉砂质泥岩(epidote metamorphic silty mudstone); 14—板岩(slate); 15—绢云母泥质板岩(sericite argillaceous slate); 16—黑云母安山岩(biotite andesite); 17—变质英安质岩屑晶屑凝灰岩(metamorphic dacite lithic crystal tuff); 18—变质英安质熔结凝灰岩(metamorphic dacite ignimbrite); 19—变质晶屑岩屑凝灰岩(metamorphic crystal lithic tuff); 20—变质英安质晶屑岩屑凝灰岩(metamorphic dacite crystal lithic tuff); 21—变质英安质晶屑岩屑凝灰岩熔岩(metamorphic dacite crystal lithic tufflava); 22—变质安山质岩屑凝灰岩(metamorphic andesitic lithic tuff); 23—绿帘斜黝帘蚀变岩(epidote clinozoisite altered rock); 24—蚀变火山角砾岩(altered volcanic breccia); 25—凝灰岩(tuff); 26—闪长岩(diorite); 27—构造角砾岩(tectonic breccia); 28—断层(fault)

8.灰黑色碳质绢云泥质板岩	1.9 m
7.深灰色碳质绿帘硅质岩	4.7 m
6.灰黑色碳质绢云泥质板岩	7.3 m
5.灰黑色绿帘变质碳质泥岩	4.6 m
4.灰黑色含粉砂质碳质泥岩	3.7 m
3.黄褐色流纹质晶屑岩屑凝灰岩	3 m
2.灰黑色钙质泥岩	3.9 m
1.灰白色绿帘变质泥岩	>15.7 m
未见底	

### 1.2 库伦杂岩同位素年代学

本研究锆石 U-Pb 同位素测年样品采自剖面第 26 层,岩性为灰黑色变质英安质晶屑岩屑凝灰岩,测试结果为  $391.0 \pm 3.7$  Ma (表 2),时代为中泥盆世. 侵入本组硅质碳质泥岩中的基性岩脉中获得锆石 U-Pb 同位素测试结果为  $255.7 \pm 8.7$  Ma,时代为晚二叠世. 由于该基性岩脉为后期侵入,故库伦杂岩形成至少早于晚二叠世. 通过区域对比,结合同位素测年数据将库伦杂岩形成时代定为中泥盆世(图 3).

### 1.3 库伦杂岩岩石地球化学反映出的大地构造环境

库伦杂岩岩性为泥质板岩夹安山岩及凝灰岩,凝灰岩夹层出现频率较高,说明当时区内泥盆系的形成大地构造环境为强烈的构造岩浆活动区. 通过对库伦杂岩泥岩、泥质板岩地球化学分析(表 3),在形成环境判别图上,部分样品落在火成岩区及其边缘,说明库伦杂岩主要物质来源于火山岩区,使得本组含有丰富的火山物质. 在  $\log(K_2O/N_2O)-SiO_2$  图解(图 4)上,样品多落入岛弧区,也说明库伦杂岩主体环境为岛弧相. 在  $(Fe_2O_3+MgO)-TiO_2$  图解(图 5)中,样品落在大洋岛弧及大陆边缘弧,说明其形成时处于强构造活动阶段. 对剖面中采集的安山岩样品投入 Rb-(Y+Nb)图解(图 6),判别其成因为火山岛弧环境,在 La/Yb-Th 图解(图 7)落在大陆边缘弧中,FAM 图解属钙碱性系列安山岩. 通过对构造环境及岩石地球化学图解分析,认为库伦杂岩属火山-沉积岩系,形成于晚期岛弧环境.

表 2 库伦杂岩中变凝灰岩样品中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of metamorphic tuff samples in Kulun complex

样品号	Pb/10 <sup>-6</sup>	Th/10 <sup>-6</sup>	U/10 <sup>-6</sup>	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ	年龄/Ma			
									<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ
TW14KL001-01	11	107	141	0.75	0.47179	0.01969	0.06275	0.00101	392	14	392	6
TW14KL001-02	9	85	111	0.77	0.46781	0.01686	0.06207	0.00094	390	12	388	6
TW14KL001-03	6	62	78	0.80	0.47115	0.01821	0.06219	0.00096	392	13	389	6
TW14KL001-04	213	213	416	0.51	7.46078	0.10153	0.39951	0.00521	2168	12	2167	24
TW14KL001-05	165	212	418	0.51	4.66875	0.06295	0.31406	0.00407	1762	11	1761	20
TW14KL001-06	15	78	206	0.38	0.47502	0.01333	0.06289	0.00089	395	9	393	5
TW14KL001-07	97	36	269	0.13	4.75444	0.09245	0.31493	0.00443	1777	16	1765	22
TW14KL001-08	10	107	122	0.88	0.47301	0.01693	0.06279	0.00096	393	12	393	6
TW14KL001-09	10	75	127	0.59	0.47918	0.02292	0.06302	0.00108	398	16	394	7
TW14KL001-10	150	125	248	0.50	10.26069	0.15839	0.46346	0.00632	2459	14	2455	28
TW14KL001-11	17	136	213	0.64	0.47387	0.02021	0.06282	0.00103	394	14	393	6
TW14KL001-12	133	266	314	0.85	4.61796	0.07607	0.31483	0.00425	1753	14	1764	21
TW14KL001-13	13	84	167	0.50	0.46454	0.01526	0.06211	0.00092	387	11	388	6
TW14KL001-14	362	71	1022	0.07	4.64609	0.06368	0.31332	0.00409	1758	11	1757	20
TW14KL001-15	256	81	465	0.17	9.74907	0.12458	0.45323	0.00589	2411	12	2410	26
TW14KL001-16	167	76	459	0.17	4.56494	0.06818	0.31337	0.00416	1743	12	1757	20
TW14KL001-17	84	60	221	0.27	4.72719	0.08725	0.31511	0.00440	1772	15	1766	22
TW14KL001-18	145	92	390	0.24	4.58139	0.06815	0.31419	0.00417	1746	12	1761	20
TW14KL001-19	217	70	632	0.11	4.29496	0.06834	0.29972	0.00403	1692	13	1690	20
TW14KL001-20	237	56	698	0.08	4.24197	0.05882	0.29830	0.00390	1682	11	1683	19
TW14KL001-21	9	114	100	1.14	0.43074	0.02394	0.06209	0.00113	364	17	388	7
TW14KL001-22	15	153	185	0.83	0.45129	0.01527	0.06257	0.00094	378	11	391	6
TW14KL001-23	135	95	375	0.25	4.31179	0.07040	0.30002	0.00406	1696	13	1691	20

表 3 库伦杂岩碎屑岩岩石化学成分

Table 3 Petrochemical compositions of clastic rocks in Kulun complex

序号	岩性	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Los	总和
1	绿帘变质泥岩	55.00	15.50	5.26	4.67	3.16	1.94	10.57	1.41	0.77	0.25	0.18	1.35	100.06
2	钙质泥岩	60.84	16.60	5.32	2.88	3.06	3.16	2.34	1.89	0.80	0.23	0.09	2.88	100.07
3	碳质绢云泥质板岩	63.79	16.85	5.15	2.25	3.4	1.1	1.26	1.83	0.71	0.092	0.095	3.29	99.82
4	绿帘变质泥岩	62.03	14.00	4.45	3.54	1.81	3.07	7.43	1.07	0.71	0.16	0.16	1.63	100.04

含量单位:%.

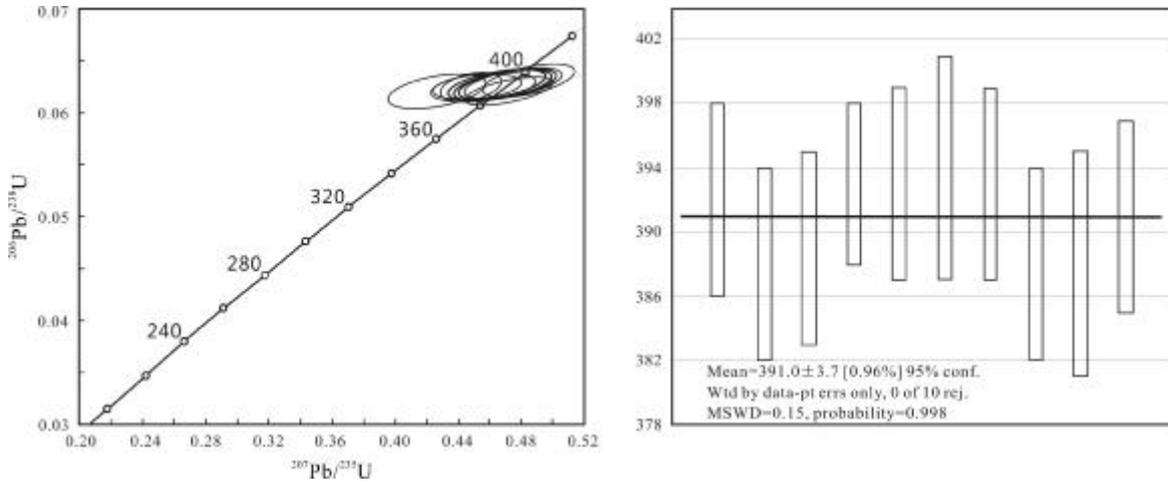


图 3 库伦杂岩变凝灰岩锆石 U-Pb 年龄谐和图及加权平均年龄图

Fig. 3 Zircon U-Pb age concordia and weighted average age diagrams of metamorphic tuff in Kulun complex

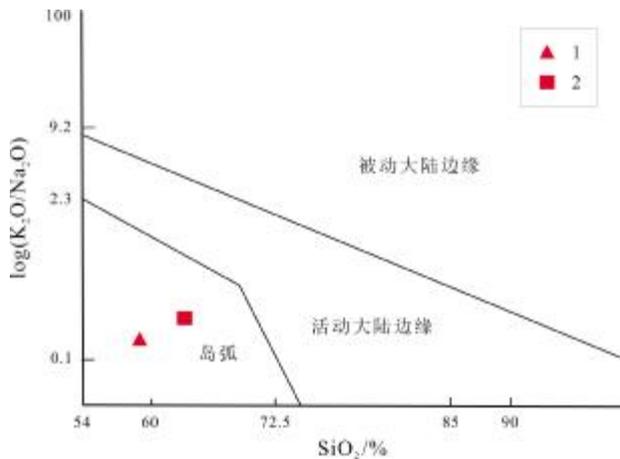


图 4 库伦杂岩  $\log(N_2O/K_2O)$ - $SiO_2$  图解  
(据文献[10])

Fig. 4 The  $\log(N_2O/K_2O)$ - $SiO_2$  diagram of Kulun complex  
(After Reference [10])

1—绿帘变质泥岩(epidote meta mudstone); 2—硅质绢云泥质板岩(siliceous sericite argillaceous slate)

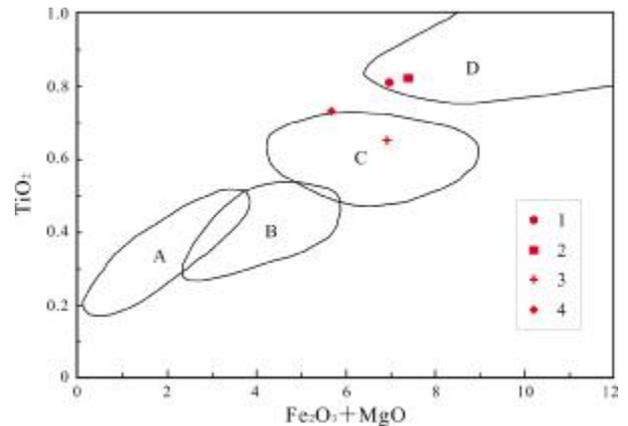


图 5 库伦杂岩形成构造环境判别图解  
(据文献[11])

Fig. 5 Tectonic environment discrimination diagram of Kulun complex  
(After Reference [11])

A—克拉通盆地 (craton basin); B—大陆壳内裂谷及弧后盆地 (intracontinental rift and back-arc basin); C—大陆边缘弧 (continental marginal arc); D—大洋弧 (oceanic arc); 1—绿帘变质泥岩(epidote meta mudstone); 2—钙质泥岩(calcareous mudstone); 3—碳质绢云泥质板岩(carbonaceous sericite argillaceous slate); 4—绿帘变质泥岩 (epidote meta mudstone)

## 2 区域上与库伦杂岩相关的岩石地层特征、同位素年龄、地层古生物及大地构造环境

从研究区大地构造位置及地质略图(图 1)看,区域上与库伦杂岩相关的岩石地层沿东西走向分布,主要有志留系方家屯岩组( $S_2f$ )、西别河岩组( $S_{3x}$ ),石炭系白家店组( $C_{1b}$ )、酒局子组( $C_{2j}$ ),二叠系佟家屯岩组( $P_{1t}$ )、叶茂台岩组( $P_{2ym}$ )(表 1)。这些岩石地层的岩石学特征、同位素年龄、地层古生物及反映的大地构造环境,揭示了库伦杂岩在大地构造演化过程中的特征。

### 2.1 中志留统方家屯岩组

方家屯岩组主要分布于法库县卧牛石乡孙家屯、西关屯东沟、陈五十屯、公主陵及康平县鹿场一带,出露面积约 3.23  $km^2$ ,岩石类型包括透辉透闪片岩、变粒岩、绿帘绿泥片岩,被二叠纪侵入岩侵入。原岩为一套火山-沉积岩建造,遭受了绿帘-角闪岩相的区域变质

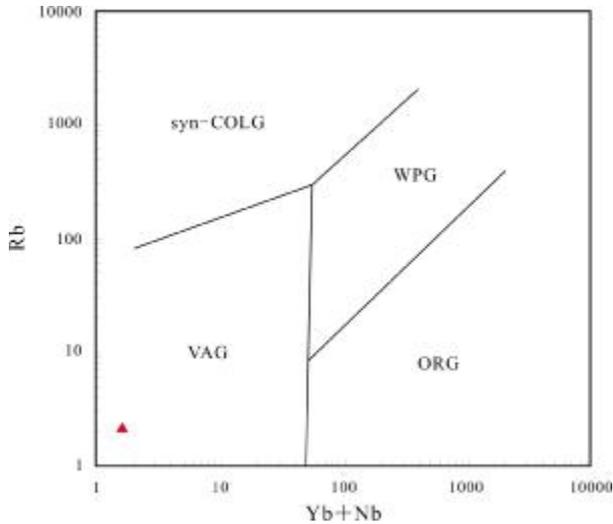


图6 黑云母安山岩构造环境 Rb-(Y+Nb)判别图  
(据文献[12])

Fig. 6 The Rb-(Y+Nb) diagram of tectonic environment discrimination for biotite andesite  
(After Reference [12])

Syn-CLOG—同碰撞花岗岩 (syn-collision granite); VAG—火山弧花岗岩 (volcanic arc granite); ORG—大洋中脊花岗岩 (oceanic ridge granite); WPG—板内花岗岩 (within-plate granite)

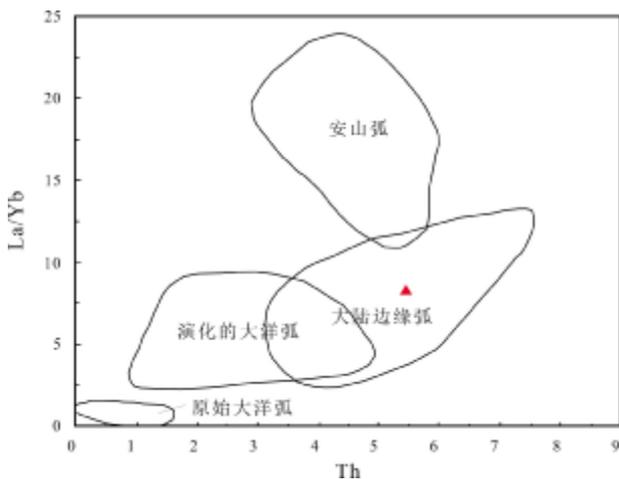


图7 黑云母安山岩构造环境 La/Yb-Th 判别图  
(据文献[13])

Fig. 7 The La/Yb vs. Th diagram of tectonic environment discrimination for biotite andesite  
(After Reference [13])

作用。原 1:25 万铁岭幅区调将该套地层置于佟家屯岩组, 本次工作在花岗闪长糜棱岩取得锆石年龄  $433.4 \pm 4.2$  Ma (数据另发), 将该套地层置于本研究新

建立的志留系中统方家屯岩组<sup>①</sup>。此岩组多发生糜棱岩化, 糜棱面理产状为  $(260 \sim 303^\circ) \angle (14 \sim 50^\circ)$ , 线理产状为  $(214 \sim 230^\circ) \angle (4 \sim 16^\circ)$ 。其中花岗闪长质糜棱岩、石英闪长质糜棱岩、石英闪长质超糜棱岩、长英质超糜棱岩变形较强, 透辉透闪片岩和黑云斜长变粒岩变形较弱。花岗质糜棱岩变形组构较发育, 石英以扁豆状至拔丝拉长状变形为主, 部分长石拉长呈条纹、条痕状, 部分长石残斑以脆性变形为主。透辉透闪片岩硬度较软, 发育鳞片变晶结构, 镜下可见白云母, 部分透闪石变斑晶变形较强, 定向排列。

## 2.2 上志留统西别河岩组

西别河岩组也为一套火山沉积地层, 主要分布于旧庙拉民搞-苏子沟及上苏木土等地区, 出露面积约为  $71.4 \text{ km}^2$ , 为碳酸盐岩、陆缘碎屑岩及少量火山岩岩石组合, 岩石类型包括灰白色大理岩夹斜长角闪岩、二长浅粒岩及石英二云片岩, 反映了相对于库伦杂岩形成较浅的水环境。岩层被肉红色似斑状碱长花岗岩侵入, 顶部与白家店组灰色钙质碳质页岩碎斑岩以断层接触。西别河岩组中火山岩明显少于库伦杂岩, 说明其形成时火山活动较火山岛弧环境弱。此外, 西别河岩组地层产状相对于库伦杂岩较平缓, 这些特征表明西别河岩组可能形成于弧后盆地沉积环境。

近年来的研究表明, 在奥陶纪—志留纪期间, 华北板块北缘处于岛弧发育的活动大陆边缘环境, 如白乃庙岛弧带、包尔汉图岛弧带等<sup>[14-15]</sup>。本区方家屯岩组及西别河岩组的确立, 也证实了该时期岛弧发育的活动大陆边缘环境在整个华北板块北缘普遍存在。

## 2.3 石炭系—二叠系

早石炭世, 受志留纪末—泥盆纪弧—陆碰撞后伸展作用影响, 研究区北部白音花一带重新拉张形成新的裂隙槽, 并广泛发育了一套碳酸盐岩、陆缘碎屑岩建造 (白家店岩组), 角度不整合覆盖于上志留统西别河岩组之上。本次研究在库伦旗北白家店岩组中发现了一套早石炭世古生物化石组合, 以腕足类、珊瑚为主, 包括 *Dibunophyllum* 延限带 (刺毛虫) 腕足类 *Linoproductus-Gigantoproductus* 组合带、*Schuchertella* 富集带、*Neuropteris* 与 *Lepidodendron* 组合带, 说明本区早石炭世海水环境应为浅海—半深海相。晚石炭

① 张志斌, 等. 辽宁 1:5 万后新秋、方家屯、獐子洞、双台子、叶茂台、登仕堡子幅区域地质调查报告. 2018.

世, 研究区形成了一套海陆交互的陆缘碎屑岩为主夹碳酸盐岩建造(酒局子岩组), 见植物化石。从白家店岩组的浅海相到酒局子岩组的海陆交互相, 代表了一个海退过程, 也代表着古亚洲洋的萎缩。

至早中二叠世, 研究区东北部又广泛发育了一套岛弧型火山岩建造(佟家屯岩组、叶茂台岩组), 同时伴随强烈的岩浆活动, 在旧庙-平安地-哈尔套-法库一带近东西向分布了大量的二叠纪花岗岩, 这都是华北板块与古亚洲洋拼合板块碰撞拼合的产物, 缝合线位于西拉木伦河一带。至此华北板块北缘完成最后一次增生过程。

### 3 内蒙古库伦-辽宁彰武、法库地区古生代增生型造山带构造演化

本研究在内蒙古库伦-辽宁彰武、法库地区识别出古生代期间的火山-沉积事件及岩浆事件。结合前人研究成果, 总结出华北板块北缘东段古生代增生型造山带的构造演化过程:

(1) 早古生代志留纪以前, 在华北板块北缘显示出活动大陆边缘性质。其北侧的洋中脊的扩张, 导致洋壳板块向华北板块之下俯冲, 形成了沟-弧-盆系。志留纪末发生弧-陆碰撞, 完成一次岛弧增生过程<sup>[16]</sup>, 并使研究区地壳在泥盆纪抬升为陆, 同时伴随有强烈的岩浆活动及变质变形作用发生。

华北板块北缘志留纪岩浆岩岩石组合及地球化学特征显示出岛弧岩带特征<sup>[16]</sup>, 泥盆纪岩浆岩岩石组合及地球化学特征显示出伸展背景的岩浆作用特征。早古生代期间, 在华北板块北侧发育了白乃庙岛弧岩带, 该岩带开始于早奥陶世(约 475 Ma), 结束于晚志留世(约 420 Ma)。志留纪末期, 白乃庙岛弧与华北克拉通北缘发生弧-陆碰撞, 白乃庙岛弧增生拼贴在华北克拉通北缘之上<sup>[17]</sup>。泥盆纪期间, 华北板块北缘进入弧-陆碰撞后伸展阶段<sup>[18-23]</sup>。华北板块北缘石炭系的形成可能与此次弧-陆碰撞后的伸展背景有关。但在东段没有发现早奥陶世至晚志留世的侵入岩浆行动。本研究在法库地区获得早志留世花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄  $437.1 \pm 3.4$  Ma, 填补了此段侵入岩记录的空白, 也说明在此地区也存在同白乃庙岛弧岩带时间上大致相近的岛弧岩浆岩带。该期侵入岩主要分布在叶家沟-大辛屯-姜家沟-小辛屯一带, 在高马堡一带零星产出,

多呈不规则、椭圆状, 出露面积 29.54 km<sup>2</sup>。主要岩石类型为片麻状花岗闪长岩、糜棱岩化花岗闪长岩、糜棱岩化黑云母花岗闪长岩, 岩石后期发生动力变质作用, 变形强烈。

研究区内虽未见有与此次弧-陆碰撞有关的泥盆纪岩浆活动, 但晚志留世西别河岩组与早石炭世白家店岩组之间的角度不整合可能与这一弧-陆碰撞过程有关。

(2) 从石炭纪开始, 在华北板块北缘形成新的裂陷槽, 形成了白家店岩组浅海一半深海相沉积、酒局子岩组海陆交互相沉积。二叠纪末, 伴随古亚洲洋板块的闭合以及与华北板块的碰撞, 研究区内形成了佟家屯岩组、叶茂台岩组火山岩及广泛分布的二叠纪碰撞型花岗岩, 完成第二次增生过程。伴随强烈造山作用, 普遍发生了绿片岩相的变质作用, 使佟家屯岩组、叶茂台岩组、白家店组、酒局子组不同程度地发生浅变质作用, 并使库伦杂岩、西别河岩组、方家屯岩组发生了退变质。

早石炭世晚期一中二叠世, 侵入岩呈平行于华北板块北缘边界的東西向带状分布在内蒙古隆起之上<sup>[24-27]</sup>, 在岩石组合、矿物组合、岩石地球化学、同位素组成及空间分布等方面均显示出活动大陆边缘岩浆弧的特征, 并且可以与世界典型大陆边缘岩浆弧相对比<sup>[28-29]</sup>。早石炭世晚期一中二叠世岩浆活动发育的构造背景应为安第斯型活动大陆边缘, 其形成与古亚洲洋板块向华北板块的俯冲有关<sup>[30]</sup>。华北板块北缘内蒙古隆起大致代表了这一安第斯型活动大陆边缘弧的范围。同时在古亚洲洋板块向南俯冲过程中, 由于弧后局部扩张作用, 在内蒙古隆起南侧的沉积盆地中还有少量基性岩浆侵入(如研究区内的不可金石英闪长岩和冀东东湾子基性岩体)。在早石炭世晚期一中二叠世期间, 研究区内存在碰撞前-同碰撞期-造山后构造背景的岩浆岩体, 是古亚洲洋板块向华北板块俯冲、碰撞造山演化过程的岩浆活动记录。

(3) 从边缘海槽的封闭时间来看, 华北板块北缘陆壳的形成是在中二叠世。而于晚二叠世末, 古亚洲洋板块与华北板块碰撞对接, 形成统一的华北板块。

二叠纪末-三叠纪岩浆岩在岩石组合、岩浆演化、矿物组成、地球化学及同位素组成等方面均显示后碰撞/后造山岩浆作用的特征<sup>[31-36]</sup>。华北板块与古亚洲洋

板块的拼合过程为弱碰撞过程,因此缺失显著的同碰撞期高压变质、地壳加厚及强过铝质S型花岗岩。

研究区内属于该期岩浆活动的岩体有大赵贝堡二长花岗岩、张大坝闪长岩、大三麻子二长花岗岩、扎兰营子闪长岩、石场石英闪长岩。在Rb-(Yb+Nb)图解中,上述岩体均落入火山弧花岗岩区域内,在Rb-(Yb+Ta)图解中,除大三麻子二长花岗岩和大赵贝堡二长花岗岩落入板内花岗岩区域外,其余岩体基本落入火山弧花岗岩区域内<sup>①</sup>,可能反映了在二叠纪末古亚洲洋闭合,华北板块与古亚洲洋板块碰撞拼合后的板内环境。同时,在R<sub>1</sub>-R<sub>2</sub>图解中,上述岩体所采集样品大部分落入造山晚期区域内<sup>①</sup>,反映该时期古亚洲洋板块与华北板块的陆陆碰撞已经进入造山作用的晚期了。

尽管目前对华北板块与古亚洲洋板块最终碰撞拼合时代还存在一定争议,但近期大量的多学科研究结果均支持华北板块与古亚洲多岛洋拼贴板块最终碰撞拼合时间为二叠纪末—三叠纪初期,且最终缝合带位于西拉木伦—长春—延吉一线。华北板块北缘二叠纪末—三叠纪岩浆岩形成于后碰撞/后造山构造环境与这一认识相符合<sup>①</sup>。

#### 4 结论

(1)库伦杂岩的发现与研究结果证明,在华北板块北缘东段存在着泥盆纪岛弧体系。

(2)该发现填补了索伦—西拉木伦—长春—延吉古亚洲洋缝合带中部古生代构造演化证据的重要一环。

#### 参考文献(References):

- [1]谢鸣谦. 拼贴板块构造及其驱动机理——中国东北及邻区的大地构造演化[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1-256.  
Xie M Q. Collage plate tectonics and its driving mechanism: Tectonic evolution of Northeast China and its adjacent areas [M]. Beijing: Science Press, 2000: 1-256. (in Chinese)
- [2]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.
- [3]时溢, 石绍山, 舒广龙. 辽宁北部早古生代弧-陆碰撞作用的发现及其构造意义[J]. 地质与资源, 2020, 29(4): 397-400.  
Shi Y, Shi S S, Shu G L. Discovery of the Early Paleozoic arc-continent collision in northern Liaoning Province: Tectonic implication [J]. Geology and Resources, 2020, 29(4): 397-400.
- [4]周建波, 张兴洲, 马志红, 等. 中国东北地区的构造格局与盆地演化[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(5): 530-538.  
Zhou J B, Zhang X Z, Ma Z H, et al. Tectonic framework and basin evolution in Northeast China[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(5): 530-538.
- [5]刘永江, 张兴洲, 金巍, 等. 东北地区晚古生代区域构造演化[J]. 中国地质, 2010, 37(4): 943-951.  
Liu Y J, Zhang X Z, Jin W, et al. Late Paleozoic tectonic evolution in Northeast China[J]. Geology in China, 2010, 37(4): 943-951.
- [6]王成文, 金巍, 张兴洲, 等. 东北及邻区晚古生代大地构造属性新认识[J]. 地层学杂志, 2008, 32(2): 119-136.  
Wang C W, Jin W, Zhang X Z, et al. New understanding of the Late Paleozoic tectonics in northeastern China and adjacent areas[J]. Journal of Stratigraphy, 2008, 32(2): 119-136.
- [7]李双林, 欧阳自远. 兴蒙造山带及邻区的构造格局与构造演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18(3): 45-54.  
Li S L, Ouyang Z Y. Tectonic framework and evolution of Xing'anling-Mongolian Orogenic Belt (XMOB) and its adjacent region [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1998, 18(3): 45-54.
- [8]李继亮. 增生型造山带的基本特征[J]. 地质通报, 2004, 23(9/10): 947-951.  
Li J L. Basic characteristics of accretion-type orogens [J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(9/10): 947-951.
- [9]徐备, 陈斌. 内蒙古北部华北板块与西伯利亚板块之间中生代造山带的结构及演化[J]. 中国科学(D辑), 1997, 27(3): 227-232.  
Xu B, Chen B. The structure and evolution of the Mesozoic orogenic belt between the North China Plate and the Siberian Plate in northern Inner Mongolia [J]. Science in China (Series D), 1997, 27(3): 227-232. (in Chinese)
- [10]Roser B P, Korsch R J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using silica content and potassium oxide/sodium oxide ratio [J]. The Journal of Geology, 1986, 94(5): 635-650.
- [11]Bhatia M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones [J]. The Journal of Geology, 1983, 91(6): 611-627.
- [12]Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. Journal of Petrology, 1984, 25: 956-983.
- [13]Condie K C. Geochemistry and tectonic setting of Early Proterozoic supracrustal rocks in the southwestern United States [J]. The Journal of Geology, 1986, 94(6): 845-864.
- [14]杨泽黎, 刘洋, 滕飞, 等. 白乃庙岛弧东段早古生代火山岩年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 高校地质学报, 2019, 25(2): 206-220.

①李东涛, 等. 1:250 000 阜新市幅区域地质调查报告. 2012.

- Yang Z L, Liu Y, Teng F, et al. Geochronology and geochemistry of the Early Paleozoic volcanic rocks in eastern segment of the Bainaimiao arc, and their geological significances[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2019,25(2):206-220.
- [15]胡晓佳,杨泽黎,王树庆,等. 内蒙古包尔汉图岛弧早古生代火山岩年代学、地球化学特征——岩石成因及对兴蒙造山带构造演化的约束[J]. *地质学报*, 2022,96(3):897-917.
- Hu X J, Yang L Z, Wang S Q, et al. Geochronology and geochemistry of the Early Paleozoic volcanic rocks from the Baerhantu arc in Inner Mongolia: Petrogenesis and constraints on the tectonic evolution of the Xing-Meng orogenic belt [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022,96(3):897-917.
- [16]Shi Y, Shi S S, Liu Z H, et al. Petrogenesis of the late Early Palaeozoic adakitic granitoids in the southern margin of the Songliao Basin, NE China: Implications for the subduction of the Palaeo-Asian Ocean[J]. *Geological Journal*, 2019, 54(6):3821-3839.
- [17]李锦轶,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.
- [18]张拴宏,赵越,刘建民,等. 华北地块北缘晚古生代—早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景[J]. *岩石矿物学杂志*, 2010,29(6):824-842.
- Zhang S H, Zhao Y, Liu J M, et al. Geochronology, geochemistry and tectonic setting of the Late Paleozoic: Early Mesozoic magmatism in the northern margin of the North China block: A preliminary review[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2010,29(6):824-842.
- [19]罗镇宽,苗来成,关康,等. 河北张家口水泉沟岩体 SHRIMP 年代学研究及其意义[J]. *地球化学*, 2001,30(2):116-122.
- Luo Z K, Miao L C, Guang K, et al. SHRIMP chronological study of Shuiquangou intrusive body in Zhangjiakou area, Hebei Province and its geochemical significance[J]. *Geochimica*, 2001,30(2):116-122.
- [20]刘建峰,李锦轶,迟效国,等. 华北克拉通北缘与弧-陆碰撞相关的早泥盆世长英质火山岩——锆石 U-Pb 定年及地球化学证据[J]. *地质通报*, 2013,32(2/3):267-278.
- Liu J F, Li J Y, Chi X G, et al. Early Devonian felsic volcanic rocks related to the arc-continent collision on the northern margin of North China craton: Evidences of zircon U-Pb dating and geochemical characteristics[J]. *Geological Bulletin of China*, 2013,32(2/3):267-278.
- [21]Liu J M, Zhao Y, Sun Y L, et al. Recognition of the latest Permian to Early Triassic Cu-Mo mineralization on the northern margin of the North China block and its geological significance [J]. *Gondwana Research*, 2010,17(1):125-134.
- [22]Shi Y R, Liu D Y, Miao L C, et al. Devonian A-type granitic magmatism on the northern margin of the North China Craton: SHRIMP U-Pb zircon dating and Hf-isotopes of the Hongshan granite at Chifeng, Inner Mongolia, China[J]. *Gondwana Research*, 2010,17(4):632-641.
- [23]Zhang S H, Zhao Y, Song B, et al. Petrogenesis of the Middle Devonian Gushan diorite pluton on the northern margin of the North China block and its tectonic implications [J]. *Geological Magazine*, 2007,144(3):553-568.
- [24]王惠初,赵凤清,李惠民,等. 冀北闪长质岩石的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄:晚古生代岩浆弧的地质记录[J]. *岩石学报*, 2007,23(3):597-604.
- Wang H C, Zhao F Q, Li H M, et al. Zircon SHRIMP U-Pb age of the dioritic rocks from northern Hebei: The geological records of Late Paleozoic magmatic arc [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007,23(3):597-604.
- [25]张拴宏,赵越,宋彪,等. 冀北隆化早前寒武纪高级变质区内的晚古生代片麻状花岗闪长岩-锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其构造意义 [J]. *岩石学报*, 2004,20(3):621-626.
- Zhang S H, Zhao Y, Song B, et al. The Late Paleozoic gneissic granodiorite pluton in Early Pre-Cambrian high-grade metamorphic terrains near Longhua County in northern Hebei Province, North China: Result from zircon SHRIMP U-Pb dating and its tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004,20(3):621-626.
- [26]Zhang S H, Zhao Y, Song B, et al. Contrasting Late Carboniferous and Late Permian-Middle Triassic intrusive suites from the northern margin of the North China craton: Geochronology, petrogenesis, and tectonic implications [J]. *GSA Bulletin*, 2009,121(1/2):181-200.
- [27]Zhang S H, Zhao Y, Liu X C, et al. Late Paleozoic to Early Mesozoic mafic-ultramafic complexes from the northern North China Block: Constraints on the composition and evolution of the lithospheric mantle [J]. *Lithos*, 2009,110(1/4):229-246.
- [28]Ducea M. The California arc: Thick granitic batholiths, eclogitic residues, lithospheric-scale thrusting, and magmatic flare-ups [J]. *GSA Today*, 2001,11(11):4-10.
- [29]Lackey J S, Valley J W, Saleeby J B. Supracrustal input to magmas in the deep crust of Sierra Nevada batholith: Evidence from high- $\delta^{18}\text{O}$  zircon [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005,235(1/2):315-330.
- [30]倪志耀,翟明国,王仁民,等. 华北古陆块北缘中段发现晚古生代退变榴辉岩 [J]. *科学通报*, 2004,49(6):585-591.
- Ni Z Y, Zhai M G, Wang R M, et al. Discovery of Late Paleozoic retrograded eclogites from the middle part of the northern margin of North China Craton [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004,49(6):600-606.

- Fu J H, Li S X, Xu L M, et al. Paleo-sedimentary environmental restoration and its significance of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(6): 936-946.
- [38]李俊, 赵红格, 汪建, 等. 鄂尔多斯盆地西缘中部三叠系延长组碎屑岩沉积环境及物源示踪[J/OL]. *沉积学报*. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.120>, 2022-11-26.
- Li J, Zhao H G, Wang J, et al. Sedimentary environment and provenance tracing of clastic rocks from the Triassic Yanchang Formation in the western margin of the Ordos Basin [J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.120>, 2022-11-26.

(上接第 11 页/Continued from Page 11)

- [31]罗镇宽, 苗来成, 关康, 等. 冀东都山花岗岩基及相关花岗斑岩脉 SHRIMP 锆石 U-Pb 法定年及其意义[J]. *地球化学*, 2003, 32(2): 173-180.
- Luo Z K, Miao L C, Guan K, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Dushan granitic batholiths and related granite-porphyry dyke, eastern Hebei Province, China, and their geological significance[J]. *Geochimica*, 2003, 32(2): 173-180.
- [32]罗镇宽, 李俊建, 关康, 等. 辽宁凌源柏杖子金矿区花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. *地质调查与研究*, 2004, 27(2): 82-85, 128.
- Luo Z K, Li J J, Guan K, et al. SHRIMP zircon U-Pb age of the granite at Baizhangzi gold field in Lingyuan, Liaoning Province [J]. *Geological Survey and Research*, 2004, 27(2): 82-85, 128.
- [33]马芳, 穆治国, 刘玉琳. 河北滦平球状闪长岩年代学及其地质意义 [J]. *地质论评*, 2004, 50(4): 360-364.
- Ma F, Mu Z G, Liu Y L. Geochronology and geologic significance of the orbicular dioritic rocks in Luanping, Hebei Province [J]. *Geological Review*, 2004, 50(4): 360-364.
- [34]张拴宏, 赵越, 刘健, 等. 华北地块北缘晚古生代-中生代花岗岩体侵位深度及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2007, 23(3): 625-638.
- Zhang S H, Zhao Y, Liu J, et al. Emplacement depths of the Late Paleozoic-Mesozoic granitoid intrusions from the northern North China block and their tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(3): 625-638.
- [35]田伟, 陈斌, 刘超群, 等. 冀北小张家口超基性岩体的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成[J]. *岩石学报*, 2007, 23(3): 583-590.
- Tian W, Chen B, Liu C Q, et al. Zircon U-Pb age and Hf isotopic composition of the Xiaozhangjiakou ultramafic pluton in northern Hebei [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(3): 583-590.
- [36]Zhang S H, Zhao Y, Song B, et al. Carboniferous granitic plutons from the northern margin of the North China block: Implications for a Late Palaeozoic active continental margin [J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164(2): 451-463.

(上接第 23 页/Continued from Page 23)

- [41]彭玉鲸, 齐成栋, 周晓东, 等. 吉黑复合造山带古亚洲洋向滨太平洋构造域转换[J]. *地质与资源*, 2012, 21(3): 261-265.
- Peng Y J, Qi C D, Zhou X D, et al. Transition from Paleo-Asian Ocean domain to circum-Pacific Ocean domain for the Ji-Hei composite orogenic belt: Time mark and relationship to global tectonics [J]. *Geology and Resources*, 2012, 21(3): 261-265.
- [42]Xu W L, Ji W Q, Pei F P, et al. Triassic volcanism in eastern Heilongjiang and Jilin provinces, NE China: Chronology, geochemistry, and tectonic implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34(3): 392-402.
- [43]Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(1): 1-30.
- [44]Condie K C. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic boundary: Identification and significance [J]. *Lithos*, 1989, 23(1/2): 1-18.
- [45]Pearce J A, Norry M J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1979, 69(1): 33-47.
- [46]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.