

doi: [10.12097/gbc.2024.03.019](https://doi.org/10.12097/gbc.2024.03.019)

王永超,侯贺晟,侯芳,魏丽娟,黄始琪,安栋召. 2025. 白垩纪“大三江盆地”原型与构造古地貌演化——来自鹤岗盆地碎屑锆石年代学约束[J]. 地质通报, 44(6): 1132–1150.

Wang Yongchao, Hou Hesheng, Hou Fang, Wei Lijuan, Huang Shiqi, An Dongzhao. 2025. Cretaceous “Great Sanjiang Basin” and paleogeographic evolution: Constraint from detrital zircon dating in the Hegang basin[J]. Geological Bulletin of China, 44(6): 1132–1150(in Chinese with English abstract).

白垩纪“大三江盆地”原型与构造古地貌演化 ——来自鹤岗盆地碎屑锆石年代学约束

王永超¹, 侯贺晟^{1*}, 侯芳², 魏丽娟³, 黄始琪⁴, 安栋召⁴

(1. 深地探测与矿产勘查全国重点实验室, 中国地质科学院, 北京 100094; 2. 长庆油田公司勘探事业部, 陕西 西安 710018;
3. 军事科学院国防工程研究院, 北京 100036; 4. 中国地质科学院, 北京 100037)

摘要:【研究目的】鹤岗盆地是黑龙江东部白垩纪盆地群的重要组成部分, 对其进行沉积充填特征和源区物质组成方面的分析, 可有效揭示黑龙江东部白垩纪盆地系统演化和构造古地貌变迁的重要信息。【研究方法】针对鹤岗盆地关键层位开展了碎屑锆石年代学研究, 在充分参考已有研究成果的基础上, 系统梳理了黑龙江东部白垩纪地层的年代学格架。【研究结果】结果表明, 下白垩统城子河组、穆棱组和东山组分别形成于 116~111 Ma、111~107 Ma 和 107~105 Ma, 上白垩统猴石沟组底界年龄接近 104 Ma。根据碎屑锆石年龄组成, 认为黑龙江东部白垩纪盆地群在城子河组与穆棱组时期已经相互贯通, 形成了统一的、面积广阔的“大三江盆地”原型。此时的古地貌为西高东低, 小兴安岭成为盆地主要的母岩源区。至猴石沟组时期, 佳木斯地体发生差异隆升, “大三江盆地”原型逐渐解体, 西侧的小兴安岭被淹没至水下, 古地貌由西高东低过渡为东高西低。【结论】猴石沟组下伏的角度不整合与此次盆地系统调整密切相关, 其对应的时间跨度可能仅有 1 Ma, 甚至更短。

关键词:黑龙江东部; 鹤岗盆地; 白垩纪; 碎屑锆石测年; 物源分析; 地质调查工程

创新点:系统梳理了黑龙江东部白垩纪地层的年代学格架, 描绘了黑龙江东部白垩纪盆地群由统一到解体的全过程。

中图分类号:P531; P534.53; P597.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2025)06-1132-19

Cretaceous “Great Sanjiang Basin” and paleogeographic evolution: Constraint from detrital zircon dating in the Hegang basin

WANG Yongchao¹, HOU Hesheng^{1*}, HOU Fang², WEI Lijuan³, HUANG Shiqi⁴, AN Dongzhao⁴

(1. Laboratory of Deep Earth and Mineral Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100094, China;
2. Exploration Department of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, Shaanxi, China; 3. Research Institute for National Defense Engineering, Academy of Military Science PLA, Beijing 100036, China; 4. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: [Objective] Hegang Basin is an important component of the Cretaceous basin group in eastern Heilongjiang. The analysis of its sedimentary filling characteristics and provenance composition can effectively reveal key information about the evolution of the

收稿日期: 2024-03-13; 修订日期: 2024-08-28

资助项目: 中国地质调查局项目《深部地质调查》(编号: DD20230008)、《松嫩地块及周缘关键区带深部地质调查》(编号: DD20190010)和国家自然科学基金项目《内蒙古大青山侏罗纪源—汇系统分析与构造古地貌重建》(批准号: 41902116)、《地球动力学》(批准号: 42022029)

作者简介: 王永超(1987-), 男, 副研究员, 从事沉积盆地分析与构造解析研究。E-mail: yongchao@cags.ac.cn

* 通信作者: 侯贺晟(1980-), 男, 研究员, 从事岩石圈结构探测与资源远景研究。E-mail: heseng.hou@126.com

Cretaceous basin–mountain system and the transformation of tectonic paleogeomorphology in eastern Heilongjiang. [Methods] To well constrain the chronological framework of the basin fill, detrital zircon U–Pb dating for the crucial formations has been conducted. [Results] Based on compiling the published and our own data, ages for the Lower Cretaceous Chengzihe, Muling, and Dongshan formations are assigned to be 116~111 Ma, 111~107 Ma and 107~105 Ma, respectively, and the lower age limit for the Upper Cretaceous Houshigou Formation is thought to be ca. 104 Ma. The characteristics of detrital zircon age distribution reveal that the Cretaceous basin groups have already connected and unified a much larger prototype basin, namely the “Great Sanjiang Basin”, during the deposition of the Chengzihe and Muling formations. At that time, the paleogeography featured by a high elevation in the west and a low elevation in the east, and the Lesser Xing'an Range became the main source area for the unified basin. By the deposition of the Houshigou Formation, regional tectonic regime turned to be contraction from extension, resulting in differently uplift in the Jiamusi block and destruction of the “Great Sanjiang Basin”. Under effects of erosion and thrusting load from the eastern continental margin, the Lesser Xing'an Range reduced markedly in the elevation and eventually submerged by the water. [Conclusions] The regional unconformity under the Houshigou Formation has a tightly relationship with this basin–mountain system adjustment, and its corresponding time span could be less than 1 million years.

Key words: eastern Heilongjiang; Hegang basin; Cretaceous; detrital zircon dating; provenance analysis; geological survey engineering

Highlights: The paper systematically organized the chronostratigraphic framework of the Cretaceous strata and delineated the entire process from unification to disintegration of the Cretaceous basin group in the eastern Heilongjiang Province.

About the first author: WANG Yongchao, male, born in 1987, associate researcher, engaged in sedimentary basin analysis and tectonic interpretation research; E-mail: yongchao@cags.ac.cn

About the corresponding author: HOU Hesheng, male, born in 1980, researcher, engaged in lithosphere structure detection and resource prospects research; E-mail: hesheng.hou@126.com

Fund support: Supported by China Geological Survey projects (No. DD20230008, No. DD20190010) and National Natural Science Foundation of China projects (No. 41902116, No. 42022029)

中国东北地处西伯利亚板块、华北板块与太平洋板块夹持的构造区域内,由众多微陆块碰撞拼接而成(Wu et al., 2011; 周建波等, 2013; Wilde, 2015; Liu et al., 2017; Ma et al., 2022)。进入白垩纪,太平洋板块的俯冲作用开始主导该区域的盆山系统演化和巨量的岩浆活动(Xu et al., 2013; Sun et al., 2014),形成一系列以松辽盆地为代表的中—新生代含油气盆地。近年来,由鹤岗、汤原、三江、勃利、虎林、鸡西等盆地组成的黑龙江东部白垩纪盆地群逐渐成为众多地质学家关注的焦点(图1),原因不仅在于它们巨大的资源能源潜力和对比研究价值,还在于其沉积充填特征有效记录了盆山系统间密切的耦合过程,以及它们背后的陆缘板块俯冲作用历史(温泉波等, 2011; 赵学钦等, 2012; Sun et al., 2014; 张兴洲等, 2015; Zhang et al., 2015, 2017; Zhou et al., 2022, 2023)。尽管前人已开展大量的沉积学、年代学、地球物理等工作,但由于地表露头稀少、地层对比混乱、新生代断陷叠加(如汤原凹陷)等原因,一些关键层位的沉积时代和源区物质组成尚未获得准确约束,尤其是这些盆地是否构成过统一的“大三江盆

地”原型的讨论仍在继续,尚未形成统一认识(刘志宏等, 2011, 2014; 张兴洲等, 2015; Zhou et al., 2022, 2023)。这些问题的存在严重阻碍黑龙江东部油气资源勘探实现重大突破。

针对上述科学问题,本文以鹤岗盆地为主要研究对象,针对关键层位开展碎屑锆石年代学研究,并结合前人报道的研究成果,系统梳理黑龙江东部白垩纪地层的年代学格架和源区物质组成,为探讨早期盆地原型及构造古地貌演化过程提供实际材料。

1 区域地质概况

鹤岗盆地位于佳木斯地块西北缘,紧邻牡丹江断裂分布,东侧以左行走滑的依兰-伊通断裂为界与汤原凹陷和三江盆地相隔,总体面积接近2800 km²(图1)。根据周缘地层出露情况,判断鹤岗盆地基底主要由黑龙江杂岩、麻山群及古生代和早中生代花岗岩组成。黑龙江杂岩沿牡丹江缝合带呈SN向带状分布,主要由超基性岩、蓝片岩相枕状玄武岩、碳酸盐岩和糜棱岩化云母片岩组成,原岩主体

年龄分布在270~200 Ma之间,变质年龄集中在200~180 Ma之间(Zhou et al., 2009; 周建波等, 2013)。麻山群是佳木斯地块的重要组成部分,主要出露于桦南、密山、恒山等隆起区,是由含矽线石和石榴子石片麻岩、角闪斜长片麻岩及长英质片麻岩组成的孔兹岩系,变质作用发生在500 Ma左右(Zhou et al., 2011; Wilde, 2015)。

鹤岗盆地充填地层由老至新依次为下白垩统城子河组、穆棱组和东山组,以及上白垩统猴石沟组与苏木河组(Sun et al., 2014)(图2)。除东山组与苏木河组以火山岩为主外,其余地层均属典型的碎屑沉积建造,仅局部发育凝灰岩夹层。其中,下白垩统城子河组与穆棱组整体表现为粒度较细的河湖相沉积,岩性以中细粒砂岩为主,夹粉砂岩、泥岩和煤层(温泉波等, 2011; 赵学钦等, 2012),多数学者将其解释为坳陷阶段的沉积产物(Zhang et al., 2012, 2015,

2017)。区域上,在城子河组与穆棱组之下,还存在一套分布较局限、由碎屑岩和火山岩组成的滴道组沉积,代表了裂陷初期的沉积产物(任凤和等, 2005; Sha et al., 2009; Zhang et al., 2012; Feng et al., 2022)。上白垩统猴石沟组与下伏地层之间呈角度不整合接触,表现为粒度较粗的冲积扇相与河流相沉积,岩性以砾岩和含砾粗砂岩为主,泥岩与粉砂岩相对较少(Sun et al., 2014; 冀华丽等, 2020)。

2 样品采集与实验测试

2.1 样品采集与实验过程

本次在鹤岗地区采集了砂岩样品4件,具体采样位置见图2。样品HG200918-1(地理坐标:北纬47°21'30.95"、东经130°19'27.04")和HG231103-4(地理坐标:北纬47°27'27.83"、东经130°23'54.59")采自下白垩统城子河组(K_1c),样品HG200916-1(地

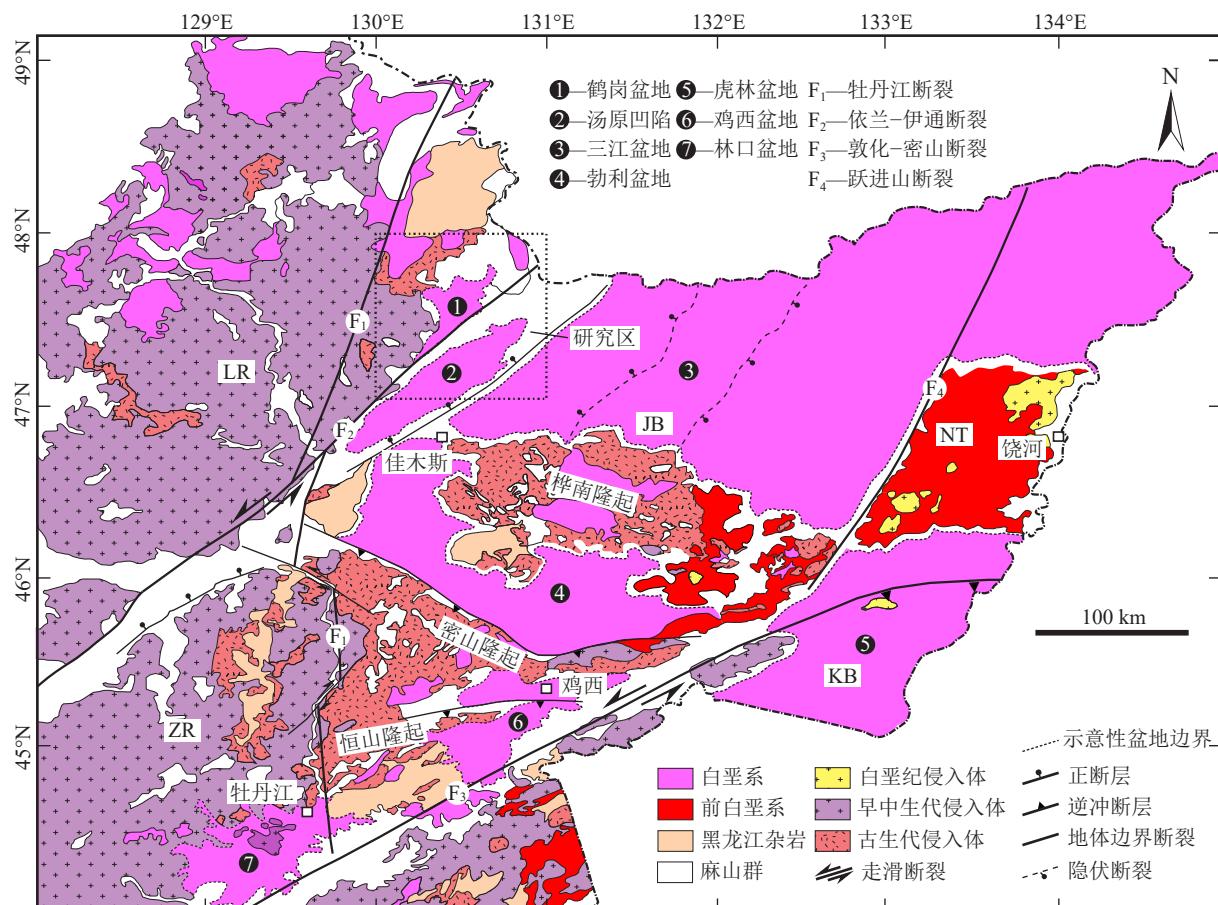


图1 佳木斯地块及邻区构造地质简图

Fig. 1 Schematic geological map of the Jiamusi block and adjacent areas

JB—佳木斯地块; LR—小兴安岭; NT—那丹哈达地体; ZR—张广才岭

理坐标:北纬 $47^{\circ}40'51.25''$ 、东经 $130^{\circ}36'02.53''$)和HG200823-1(地理坐标:北纬 $47^{\circ}36'50.93''$ 、东经 $130^{\circ}37'38.04''$)采自上白垩统猴石沟组(K_2h),岩性为灰白色与灰褐色粗粒砂岩。

样品粉碎和矿物挑选在河北省廊坊峰泽源岩矿

检测技术有限公司完成,锆石制靶、透反射光与阴极发光(CL)图像、LA-ICP-MS U-Pb定年等工作在北京锆年领航科技有限公司完成。每个样品随机挑选100颗左右锆石进行测年分析。激光束斑直径为30 μm ,脉冲频率为10 Hz。用锆石91500作为标样来

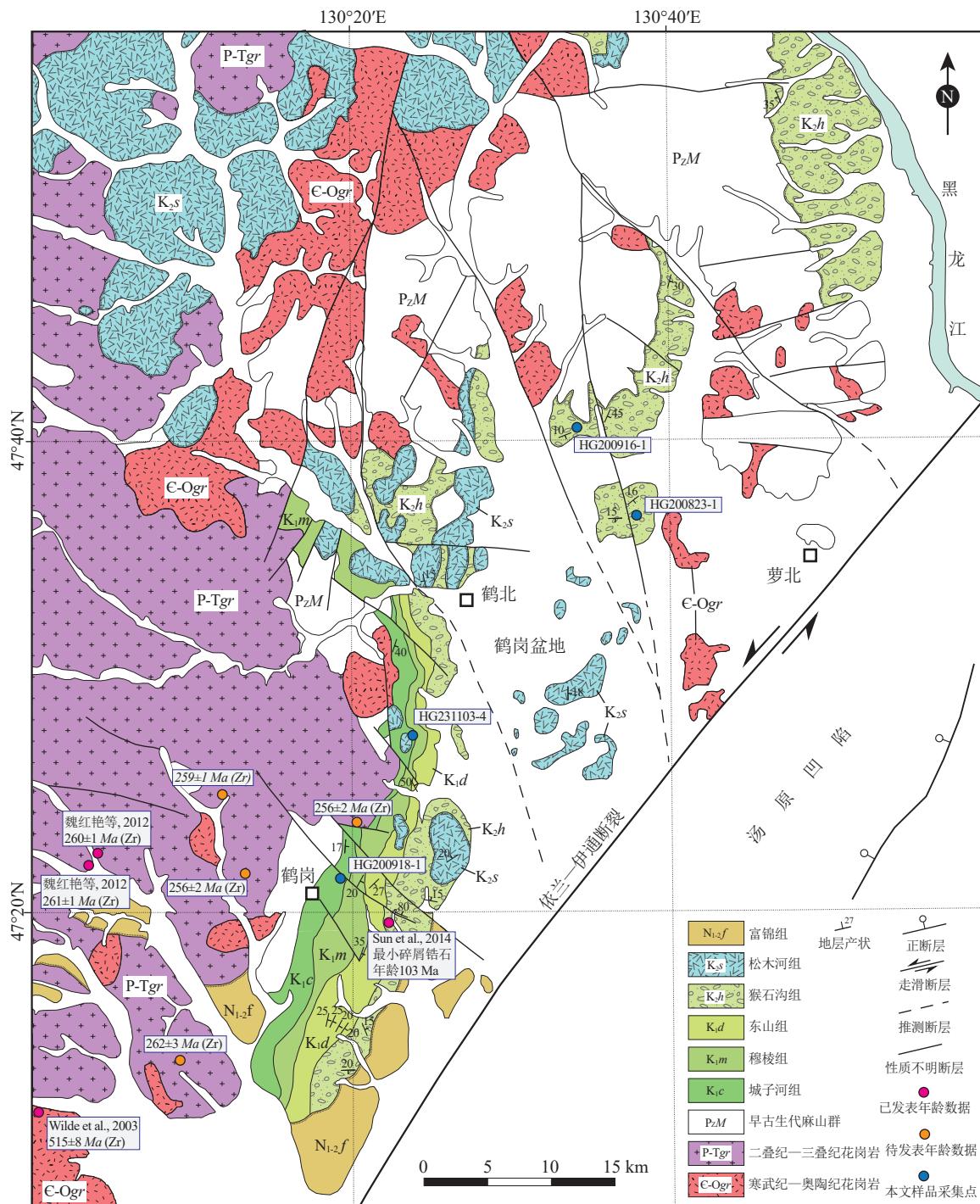


图2 鹤岗盆地及邻区构造地质简图

Fig. 2 Schematic geological map of the Hegang basin and adjacent areas

标定仪器, Plesovice 作质量监控。年龄计算和图谱制作采用 Isoplot 软件完成。

2.2 测试结果

样品 HG200918-1 测试的锆石颗粒共 100 个, 获得谐和度较高的有效年龄为 83 个(图 3-a, b)。阴极发光图像(CL)(图 4)显示, 这些锆石大多呈自形状, 内部结构清晰, 振荡环带发育。Th/U 值为 0.09~1.22(表 1), 主要集中于 0.22~0.89 之间, 指示锆石以岩浆成因为主。测得的锆石年龄均小于 500 Ma, 并可清晰划分出 3 个主要年龄区间(109~120 Ma、159~213 Ma、235~261 Ma)和 2 个次要年龄区间(299~306 Ma 和 432~467 Ma), 峰值年龄分别为 114 Ma、182 Ma、242 Ma、303 Ma 和 465 Ma(图 3-a, b)。其中, 介于最小年龄区间的锆石颗粒为 6 个, 对应的年龄加权平均值为 113.6 ± 3.6 Ma, 等于或接近鹤岗盆地城子河组的最大沉积年龄。

样品 HG231103-4 测试的锆石颗粒共 102 个, 获得谐和度较高的有效年龄为 100 个(图 3-c, d)。CL 图像(图 4)显示, 该样品锆石颗粒普遍小于样品 HG200918-1, 但两者在锆石的晶体结构、年龄分布及 Th/U 值(0.20~1.04, 表 1)方面均具有高度的相似性。此外, 最小年龄区间所含锆石增加至 15 颗, 年龄集中且稳定, 年龄加权平均值为 114.6 ± 1.2 Ma。

样品 HG200823-1 测试的锆石颗粒共 99 个, 获得谐和度较高的有效年龄为 83 个(图 3-e, f)。CL 图像(图 4)显示, 该样品锆石多呈自形或半自形状, 除年龄大于 500 Ma 的锆石颗粒外, 其余锆石均具明显的振荡环带, 且 Th/U 值主要介于 0.21~0.72 之间(表 2), 指示锆石成因以岩浆作用为主。除少数锆石年龄较大外, 其余锆石年龄主要分布在 3 个区间, 即 97~108 Ma、240~275 Ma 和 446~520 Ma, 缺少早一中侏罗世的锆石颗粒。挑选最小年龄区间内年龄最接近、谐和度最高的 14 颗锆石, 计算得到年龄加权平均值为 103.9 ± 1.1 Ma, 等于或接近鹤岗盆地猴石沟组的最大沉积年龄。

样品 HG200916-1 测试的锆石颗粒共 100 个, 获得谐和度较高的有效年龄为 78 个(图 3-g, h)。该样品锆石绝大部分具有明显的振荡环带, 少数发育增生边或环带不明显(图 4)。Th/U 值为 0.08~1.00(表 2), 大于 0.40 者占比 72%, 为岩浆成因锆石, 其余为变质成因或受一定变质作用影响的锆石。除 1 颗年龄较大锆石(845 ± 12 Ma)外, 其余锆石年龄接

近或小于 500 Ma, 并可清楚地分成以 187 Ma、256 Ma 和 482 Ma 为峰值的 3 个年龄区间(图 3-g, h)。遗憾的是, 该样品缺少能够约束猴石沟组沉积时代的年轻锆石。

3 讨论

3.1 盆地充填年代学格架

综合前人研究成果、本次测试结果及笔者尚未发表的年代学数据, 对黑龙江东部白垩纪地层的沉积时代进行探讨, 旨在建立该区白垩纪地层准确的年代学格架, 为深入认识区域构造演化提供重要参考。

城子河组是鹤岗盆地形成阶段的首套沉积记录, 是对初始裂陷过程的沉积响应。由于古生物组合的判别标准不统一及时间跨度大, 古生物研究在约束城子河组沉积时代的过程中往往存在较大差异(何承全和孙学坤, 2000; Sha et al., 2009)。相比之下, 磁性地层学研究似乎给出了一个相对准确的年龄概念, 即 125~116 Ma(任凤和等, 2005)。近年来, 随着同位素测年数据的日益积累, 能够更准确地约束该套地层沉积的时间跨度。

采自鹤岗盆地城子河组的 2 件砂岩样品不仅有相似的碎屑锆石年龄分布特征(图 3-b, d), 并且它们的最小年龄加权平均值也几乎一致, 即 113.6 ± 3.6 Ma(样品 HG200918-1)(图 3-a)和 114.6 ± 1.2 Ma(样品 HG231103-4)(图 3-c)。尽管前人在鹤岗盆地城子河组中获得的最小锆石年龄为 122 ± 2 Ma(Sun et al., 2014), 但其数量仅有 1 颗, 不具普遍性和说服性。相反, 上述 2 个年龄与 Zhang et al.(2015)报道的三江盆地城子河组碎屑锆石的最小峰值年龄(115 Ma)近于一致(图 5)。重要的是, Chen et al.(2018)在鸡西盆地城子河组中下部和上部分别发现了火山灰夹层, 年龄分别为 115.6 ± 1.1 Ma 和 111.0 ± 0.6 Ma。据此, 笔者认为黑龙江东部城子河组的沉积时代为 116~111 Ma(图 5)。

东山组是鹤岗盆地广泛出露的一套火山碎屑沉积, 磁性地层学研究将其形成时代定义为 107~102 Ma(任凤和等, 2005)。该年龄与最新报道的同位素测年结果基本一致, 例如 Zhang et al.(2020)报道了勃利盆地钻遇的东山组安山岩的锆石 U-Pb 年龄为 107.2 ± 0.7 Ma, 以及笔者尚未发表的鹤岗盆地东山组火山岩的锆石 U-Pb 年龄为 105.6 ± 0.2 Ma(图 5)。

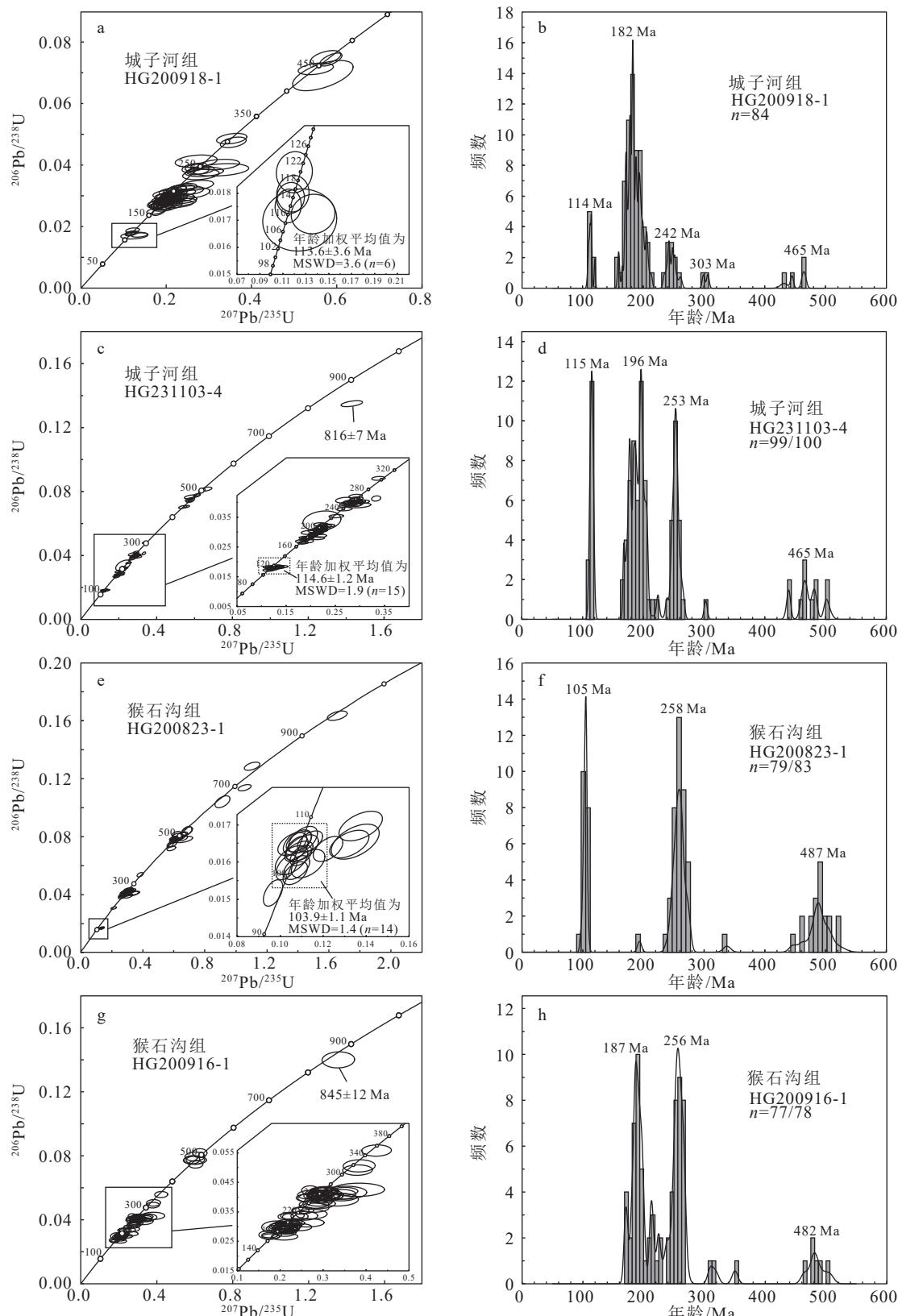


图3 鹤岗盆地城子河组与猴石沟组砂岩碎屑锆石U-Pb谐和图(a, c, e, g)和年龄分布直方图(b, d, f, h)

Fig. 3 Concordia diagrams (a, c, e, g) and probability plots (b, d, f, h) showing detrital zircon U-Pb ages of the Chengzhihe Formation and the Houshigou Formation in the Hegang basin



图4 鹤岗盆地城子河组与猴石沟组砂岩典型锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 4 CL images for representative zircons from the Chengzihe Formation and Houshigou Formation

据此,笔者将黑龙江东部东山组的形成时代进一步修订为107~105 Ma,而夹在城子河组与东山组之间的穆棱组的沉积时代应为111~107 Ma。

因与下伏地层之间普遍呈角度不整合接触,猴石沟组记录了黑龙江东部盆地属性由伸展裂陷向挤压挠曲转变的全过程(温泉波等,2011; Zhang et al., 2012, 2015, 2017; 赵学钦等,2012; Sun et al., 2014)。因此,准确约束该套地层的沉积时代对于深入理解黑龙江东部白垩纪区域性构造反转具有重要意义。碎屑锆石测年结果显示(图3-f),鹤岗盆地北部猴石沟组的最小碎屑锆石年龄区间为97~108 Ma(样品HG200823-1),相应的年龄加权平均值为103.9±1.1 Ma(图3-e)。该结果与Sun et al.(2014)报道的鹤岗市东部猴石沟组砂岩碎屑锆石年龄(103±2 Ma,最小年龄加权平均值)和火山灰夹层测年结果(103±2 Ma)基本相同,表明猴石沟组的最大沉积年龄接近或等于104 Ma(图5)。考虑到该年龄与东山组顶界年龄(105 Ma,待发表数据)非常接近,笔者认为以猴石沟组下伏不整合为代表的区域性构造反转的持续时间可能不会太久。

3.2 盆地源区与沉积古地理

就地理位置而言,鹤岗盆地潜在的物源供给区是西部的小兴安岭-张广才岭和南部的佳木斯隆起(图1)。小兴安岭-张广才岭出露最广泛的地质单元为晚三叠世—早中侏罗世侵入体(220~150 Ma)(Wu et al., 2011; 于跃江等,2024),其次是分散出露的晚二叠世—早三叠世侵入体(266~231 Ma)(魏红艳等,2012)和寒武纪—奥陶纪侵入体(505~450 Ma)

(Wang et al., 2016),另在其东侧出露少量由变质岩组成的黑龙江杂岩和麻山群,变质时代分别集中于200~180 Ma和500 Ma(Zhou et al., 2009, 2011; 周建波等,2013, 2018)。相比之下,佳木斯隆起的岩浆作用主要包括二叠纪(270~254 Ma)和早古生代(530~484 Ma)2个时期(井佳浩等,2021),缺少早中生代岩浆事件,同时黑龙江杂岩和麻山群出露范围也略有增加(图1)。

本次研究测得鹤岗盆地城子河组2件样品具有相似的碎屑锆石年龄谱,其中占比最大者(50%~73%)是峰值为182~196 Ma的早中生代年龄组,其次是晚二叠世—早三叠世年龄组(12%~22%)和早古生代年龄组(5%~11%)(图3-b, d)。该特征不仅与小兴安岭地质单元组成相匹配,也与小兴安岭流域的现代沉积物碎屑锆石年龄分布一致(Zhou et al., 2023),故城子河组时期鹤岗盆地源区主体为西侧的小兴安岭。需要指出的是,三江盆地城子河组同样具有类似的碎屑锆石年龄组成,表明该时期南部的佳木斯隆起可能尚未抬升,以致盆地内不能获得数量可观的晚二叠世—早三叠世和早古生代的锆石颗粒。所以,笔者认为,黑龙江东部白垩纪盆地群在城子河组时期可能已经相互贯通,构成了统一的、面积广阔的“大三江盆地”,并且这种西高东低的古地理格局可能一直持续到穆棱组时期,因为该套地层普遍含有大量小兴安岭特有的早中生代锆石颗粒(温泉波等,2011; Zhang et al., 2015)。沉积学研究表明,统一湖盆的沉积中心主要位于三江盆地的绥滨坳陷与勃利盆地,而三角洲沉积则沿着鹤岗盆地、汤原断

表1 城子河组 LA-ICP-MS 碎屑锆石 U-Th-Pb 测年结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Th-Pb dating results of the detrital zircons from the Chengzihe Formation

测试点	元素含量/ 10^{-6}				同位素比值						年龄/Ma						谐和度/%
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	
砂岩样品HG200918-1																	
01	23	133	363	0.37	0.0516	0.0022	0.1983	0.0084	0.0279	0.0004	333	96	184	7	178	2	96
02	43	288	485	0.59	0.0480	0.0019	0.1903	0.0074	0.0286	0.0003	102	105	177	6	182	2	97
03	66	334	1254	0.27	0.0492	0.0015	0.1828	0.0054	0.0270	0.0005	167	72	170	5	172	3	99
04	67	390	1139	0.34	0.0536	0.0022	0.1836	0.0069	0.0250	0.0006	367	97	171	6	159	4	92
05	12	68	215	0.32	0.0545	0.0027	0.2059	0.0093	0.0281	0.0004	394	109	190	8	178	3	93
06	30	191	338	0.57	0.0498	0.0020	0.2093	0.0087	0.0303	0.0004	183	94	193	7	193	2	99
07	49	224	226	0.99	0.0550	0.0020	0.3571	0.0125	0.0475	0.0007	413	83	310	9	299	4	96
08	44	274	699	0.39	0.0502	0.0016	0.1946	0.0064	0.0281	0.0003	206	76	181	5	179	2	98
09	33	241	290	0.83	0.0501	0.0022	0.1966	0.0089	0.0284	0.0004	198	99	182	8	181	2	99
10	23	154	261	0.59	0.0518	0.0025	0.2029	0.0101	0.0286	0.0004	276	108	188	9	182	3	96
11	27	146	417	0.35	0.0543	0.0021	0.2198	0.0083	0.0295	0.0004	383	92	202	7	187	2	92
12	62	370	1028	0.36	0.0470	0.0024	0.1780	0.0094	0.0274	0.0006	56	113	166	8	174	3	95
13	25	170	281	0.60	0.0501	0.0026	0.1969	0.0097	0.0288	0.0004	211	123	183	8	183	3	99
14	21	223	449	0.50	0.0483	0.0024	0.1187	0.0058	0.0180	0.0003	122	106	114	5	115	2	99
15	21	142	277	0.51	0.0500	0.0028	0.1824	0.0095	0.0269	0.0004	195	130	170	8	171	2	99
16	17	132	148	0.89	0.0544	0.0035	0.1897	0.0111	0.0268	0.0005	387	146	176	9	170	3	96
17	17	86	217	0.40	0.0525	0.0024	0.2237	0.0095	0.0321	0.0006	306	106	205	8	204	4	99
18	14	55	129	0.43	0.0595	0.0040	0.3226	0.0198	0.0402	0.0007	587	144	284	15	254	5	88
19	34	190	489	0.39	0.0509	0.0016	0.2076	0.0065	0.0296	0.0004	235	70	192	5	188	2	98
20	12	65	136	0.48	0.0577	0.0042	0.2466	0.0166	0.0318	0.0006	517	192	224	14	202	4	89
21	20	106	132	0.80	0.0560	0.0037	0.2805	0.0173	0.0371	0.0007	454	148	251	14	235	4	93
22	46	303	505	0.60	0.0503	0.0021	0.2026	0.0078	0.0296	0.0004	209	96	187	7	188	3	99
23	39	194	530	0.37	0.0505	0.0020	0.2249	0.0086	0.0324	0.0004	217	91	206	7	205	3	99
24	8	42	113	0.37	0.0650	0.0045	0.2632	0.0157	0.0309	0.0007	776	147	237	13	196	4	81
25	18	122	162	0.75	0.0588	0.0033	0.2343	0.0130	0.0294	0.0005	567	122	214	11	187	3	86
26	48	339	525	0.65	0.0489	0.0018	0.1786	0.0067	0.0266	0.0004	143	89	167	6	169	3	98
27	24	132	339	0.39	0.0531	0.0021	0.2262	0.0089	0.0309	0.0005	332	91	207	7	196	3	94
28	135	246	1101	0.22	0.0592	0.0025	0.5665	0.0291	0.0693	0.0020	576	93	456	19	432	12	94
29	18	92	213	0.43	0.0556	0.0030	0.2434	0.0115	0.0328	0.0005	439	119	221	9	208	3	93
30	48	343	404	0.85	0.0521	0.0020	0.2058	0.0080	0.0287	0.0004	300	82	190	7	183	3	96
31	27	163	287	0.57	0.0557	0.0026	0.2261	0.0103	0.0300	0.0005	443	99	207	9	190	3	91
32	26	287	383	0.75	0.0470	0.0025	0.1200	0.0064	0.0188	0.0003	56	113	115	6	120	2	95
33	16	96	140	0.69	0.0614	0.0038	0.2716	0.0160	0.0335	0.0007	654	133	244	13	213	4	86
34	18	109	218	0.50	0.0499	0.0031	0.2020	0.0120	0.0299	0.0005	187	143	187	10	190	3	98
35	23	132	277	0.48	0.0563	0.0025	0.2411	0.0111	0.0312	0.0005	461	103	219	9	198	3	89
36	32	199	477	0.42	0.0483	0.0017	0.1853	0.0063	0.0279	0.0003	122	81	173	5	178	2	97
37	25	250	531	0.47	0.0480	0.0022	0.1166	0.0050	0.0178	0.0002	98	113	112	5	114	1	98
38	9	57	133	0.43	0.0562	0.0035	0.2053	0.0125	0.0269	0.0005	461	136	190	10	171	3	89
39	20	123	228	0.54	0.0487	0.0024	0.2067	0.0096	0.0313	0.0005	200	121	191	8	199	3	95
40	13	90	154	0.58	0.0598	0.0036	0.2271	0.0144	0.0274	0.0005	598	130	208	12	175	3	82

续表 1-1

测试点	元素含量/ 10^{-6}										同位素比值										年龄/Ma			
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	%							
41	26	127	500	0.25	0.0474	0.0019	0.1947	0.0070	0.0300	0.0004	78	89	181	6	191	2	94							
42	42	229	262	0.87	0.0525	0.0022	0.2742	0.0105	0.0382	0.0005	309	127	246	8	242	3	98							
43	40	91	781	0.12	0.0502	0.0014	0.2757	0.0075	0.0398	0.0004	206	97	247	6	252	2	98							
44	39	194	389	0.50	0.0556	0.0015	0.5736	0.0144	0.0751	0.0009	435	59	460	9	467	6	98							
45	8	42	162	0.26	0.0474	0.0035	0.2695	0.0203	0.0413	0.0008	78	161	242	16	261	5	92							
46	18	122	109	1.12	0.0584	0.0039	0.2305	0.0166	0.0287	0.0005	546	144	211	14	183	3	85							
47	48	339	612	0.55	0.0507	0.0016	0.2117	0.0065	0.0303	0.0004	228	72	195	5	192	2	98							
48	47	241	334	0.72	0.0484	0.0018	0.2586	0.0090	0.0392	0.0006	117	92	234	7	248	3	94							
49	18	111	214	0.52	0.0504	0.0027	0.1938	0.0106	0.0280	0.0005	217	129	180	9	178	3	99							
50	17	91	286	0.32	0.0512	0.0021	0.2076	0.0088	0.0295	0.0004	256	94	192	7	187	2	97							
51	20	134	234	0.57	0.0499	0.0025	0.1968	0.0092	0.0288	0.0004	191	115	182	8	183	3	99							
52	11	96	332	0.29	0.0543	0.0059	0.1247	0.0132	0.0170	0.0005	383	248	119	12	109	3	90							
53	70	431	744	0.58	0.0476	0.0014	0.1996	0.0059	0.0304	0.0004	80	69	185	5	193	2	95							
54	47	332	511	0.65	0.0510	0.0030	0.1922	0.0127	0.0268	0.0005	243	135	179	11	171	3	95							
55	31	184	336	0.55	0.0515	0.0023	0.2154	0.0090	0.0307	0.0004	265	100	198	8	195	3	98							
56	20	126	236	0.53	0.0525	0.0033	0.2073	0.0138	0.0285	0.0005	309	144	191	12	181	3	94							
57	55	237	212	1.12	0.0528	0.0022	0.3529	0.0143	0.0487	0.0007	317	94	307	11	306	4	99							
58	24	157	363	0.43	0.0467	0.0019	0.1756	0.0072	0.0274	0.0004	32	96	164	6	174	3	94							
59	28	156	495	0.32	0.0510	0.0018	0.1947	0.0071	0.0277	0.0004	243	79	181	6	176	2	97							
60	15	98	174	0.56	0.0532	0.0031	0.2096	0.0121	0.0289	0.0004	339	127	193	10	183	3	94							
61	35	181	237	0.76	0.0537	0.0023	0.2817	0.0120	0.0384	0.0006	367	96	252	10	243	3	96							
62	27	185	340	0.54	0.0506	0.0025	0.1737	0.0082	0.0250	0.0004	220	115	163	7	159	3	97							
63	46	216	404	0.53	0.0493	0.0017	0.2665	0.0091	0.0393	0.0004	161	80	240	7	248	3	96							
64	36	255	394	0.65	0.0564	0.0029	0.2136	0.0101	0.0278	0.0004	478	113	197	8	177	3	89							
65	27	145	416	0.35	0.0502	0.0020	0.1986	0.0077	0.0288	0.0004	211	93	184	7	183	2	99							
66	14	98	134	0.73	0.0635	0.0040	0.2361	0.0140	0.0280	0.0005	724	135	215	11	178	3	81							
67	21	105	325	0.32	0.0509	0.0022	0.2134	0.0089	0.0307	0.0004	235	66	196	7	195	3	99							
68	18	155	127	1.22	0.0538	0.0034	0.2047	0.0124	0.0284	0.0006	365	141	189	10	181	4	95							
69	253	244	2871	0.08	0.0571	0.0010	0.5852	0.0107	0.0744	0.0009	494	73	468	7	463	5	98							
70	23	149	286	0.52	0.0482	0.0032	0.1982	0.0121	0.0306	0.0006	109	148	184	10	194	4	94							
71	27	135	375	0.36	0.0495	0.0020	0.2121	0.0081	0.0315	0.0004	172	94	195	7	200	3	97							
72	25	150	339	0.44	0.0490	0.0028	0.1919	0.0106	0.0286	0.0004	146	133	178	9	182	3	97							
73	18	80	133	0.60	0.0623	0.0051	0.3275	0.0265	0.0385	0.0008	683	176	288	20	243	5	83							
74	18	113	253	0.45	0.0508	0.0024	0.2026	0.0096	0.0289	0.0004	232	111	187	8	184	2	98							
75	57	145	306	0.47	0.0558	0.0017	0.5498	0.0169	0.0715	0.0008	456	73	445	11	445	5	99							
76	12	75	192	0.39	0.0553	0.0031	0.1927	0.0106	0.0260	0.0004	433	123	179	9	165	3	92							
77	12	62	189	0.33	0.0542	0.0025	0.2397	0.0106	0.0324	0.0005	389	102	218	9	206	3	94							
78	21	217	455	0.48	0.0477	0.0019	0.1146	0.0046	0.0175	0.0003	83	106	110	4	112	2	98							
79	38	284	254	1.12	0.0556	0.0023	0.2248	0.0093	0.0294	0.0004	439	89	206	8	186	3	90							
80	51	386	438	0.88	0.0508	0.0020	0.1886	0.0076	0.0270	0.0003	232	60	175	6	172	2	97							
81	9	102	197	0.52	0.0600	0.0037	0.1363	0.0078	0.0172	0.0003	611	135	130	7	110	2	83							
82	10	45	83	0.54	0.0565	0.0037	0.2889	0.0183	0.0378	0.0006	472	144	258	14	239	4	92							

续表 1-2

测试点	元素含量/ 10^{-6}						同位素比值						年龄/Ma						谐和度/%
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$			
83	23	162	202	0.80	0.0517	0.0026	0.2034	0.0104	0.0288	0.0004	333	118	188	9	183	3	97		
砂岩样品HG231103-4																			
01	6.9	186	186	1.00	0.0502	0.0021	0.1924	0.0079	0.0278	0.0003	206	94.4	179	6.7	177	1.9	98		
02	13.5	65.6	75.3	0.87	0.0768	0.0021	1.4299	0.0376	0.1350	0.0012	1117	53.4	901	15.7	816	7.0	90		
03	16.5	270	326	0.83	0.0540	0.0014	0.2915	0.0073	0.0392	0.0004	372	52.8	260	5.7	248	2.5	95		
04	7.6	138	132	1.04	0.0470	0.0023	0.2703	0.0129	0.0407	0.0006	55.7	111	243	10.3	257	3.9	94		
05	9.2	121	243	0.50	0.0519	0.0020	0.2293	0.0090	0.0320	0.0003	283	88.9	210	7.4	203	2.0	96		
06	7.1	165	210	0.79	0.0510	0.0021	0.1846	0.0072	0.0264	0.0003	239	94.4	172	6.1	168	1.6	97		
07	16.6	207	515	0.40	0.0492	0.0012	0.1892	0.0049	0.0278	0.0002	167	59.3	176	4.2	177	1.4	99		
08	30	130	350	0.37	0.0550	0.0010	0.5675	0.0108	0.0748	0.0007	409	40.7	456	7.0	465	4.0	98		
09	7.1	105	150	0.70	0.0516	0.0019	0.2688	0.0102	0.0378	0.0004	265	80.5	242	8.2	239	2.5	98		
10	44	143	476	0.30	0.0573	0.0010	0.6388	0.0117	0.0807	0.0006	502	38.9	502	7.3	501	3.7	99		
11	13.3	158	368	0.43	0.0508	0.0013	0.2152	0.0056	0.0308	0.0003	232	65.7	198	4.7	195	1.8	98		
12	32	325	965	0.34	0.0503	0.0010	0.2049	0.0040	0.0295	0.0002	209	44.4	189	3.4	187	1.5	99		
13	15.4	151	266	0.57	0.0508	0.0013	0.3379	0.0090	0.0481	0.0004	232	62.0	296	6.8	303	2.6	97		
14	4.5	138	207	0.66	0.0487	0.0022	0.1175	0.0053	0.0175	0.0002	200	101	113	4.8	112	1.3	99		
15	15.1	171	446	0.38	0.0509	0.0012	0.2053	0.0050	0.0292	0.0003	239	55.5	190	4.2	186	1.6	97		
16	51	390	1085	0.36	0.0588	0.0011	0.3332	0.0062	0.0413	0.0006	567	40.7	292	4.7	261	3.6	88		
17	5.4	69.1	164	0.42	0.0560	0.0023	0.2153	0.0086	0.0280	0.0003	454	88.0	198	7.2	178	2.0	89		
18	18.2	197	514	0.38	0.0531	0.0012	0.2271	0.0052	0.0310	0.0003	345	50.0	208	4.3	197	1.8	94		
19	2.00	82.5	86.8	0.95	0.0493	0.0034	0.1146	0.0077	0.0173	0.0003	161	156	110	7.0	110	1.8	99		
20	14.1	272	387	0.70	0.0504	0.0015	0.2042	0.0062	0.0294	0.0003	213	70.4	189	5.3	187	1.7	98		
21	15.0	170	313	0.54	0.0538	0.0014	0.2967	0.0074	0.0400	0.0004	365	57.4	264	5.8	253	2.2	95		
22	2.62	58.9	122	0.48	0.0474	0.0030	0.1182	0.0070	0.0181	0.0003	77.9	131	113	6.3	116	1.8	97		
23	13.0	272	383	0.71	0.0500	0.0015	0.1895	0.0055	0.0275	0.0003	198	68.5	176	4.7	175	2.1	99		
24	18.7	213	523	0.41	0.0503	0.0013	0.2162	0.0054	0.0312	0.0003	209	91.7	199	4.5	198	1.9	99		
25	10.6	119	305	0.39	0.0517	0.0015	0.2140	0.0063	0.0300	0.0003	272	63.9	197	5.3	191	2.1	96		
26	6.1	69.4	129	0.54	0.0508	0.0020	0.2766	0.0114	0.0395	0.0005	232	60.2	248	9.1	250	3.0	99		
27	11.1	128	296	0.43	0.0536	0.0016	0.2385	0.0070	0.0322	0.0003	367	66.7	217	5.8	204	2.0	93		
28	12.6	154	345	0.45	0.0502	0.0015	0.2181	0.0062	0.0315	0.0003	211	66.7	200	5.2	200	2.0	99		
29	72	244	823	0.30	0.0573	0.0009	0.6165	0.0099	0.0777	0.0007	502	37.0	488	6.3	483	4.2	98		
30	22.3	351	639	0.55	0.0502	0.0012	0.2030	0.0043	0.0293	0.0003	206	53.7	188	3.7	186	2.0	99		
31	23.6	259	656	0.40	0.0515	0.0015	0.2254	0.0065	0.0317	0.0003	261	66.7	206	5.3	201	1.7	97		
32	20.5	288	650	0.44	0.0536	0.0014	0.1985	0.0047	0.0269	0.0003	354	59.3	184	4.0	171	2.1	93		
33	16.6	278	495	0.56	0.0497	0.0012	0.1934	0.0047	0.0282	0.0003	189	57.4	180	4.0	179	1.6	99		
34	11.7	160	331	0.48	0.0520	0.0015	0.2155	0.0063	0.0300	0.0003	287	69	198	5.3	191	1.9	96		
35	2.69	80.1	121	0.66	0.0529	0.0032	0.1303	0.0079	0.0180	0.0003	324	134	124	7.1	115	1.6	92		
36	10.9	141	221	0.64	0.0507	0.0018	0.2813	0.0101	0.0401	0.0004	228	83	252	8.0	254	2.5	99		
37	32	515	855	0.60	0.0535	0.0012	0.2278	0.0052	0.0309	0.0003	350	86.1	208	4.3	196	2.1	93		
38	4.5	119	211	0.56	0.0522	0.0024	0.1263	0.0054	0.0177	0.0002	300	106	121	4.9	113	1.3	93		
39	107	661	1218	0.54	0.0566	0.0009	0.5847	0.0106	0.0748	0.0010	476	33.3	467	6.8	465	5.8	99		
40	13.3	62.6	306	0.20	0.0520	0.0015	0.2908	0.0084	0.0407	0.0005	287	66.7	259	6.6	257	3.0	99		

续表 1-3

测试点	元素含量/ 10^{-6}						同位素比值						年龄/Ma						谐和度/%	
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	%			
41	11.1	248	315	0.79	0.0496	0.0017	0.1911	0.0064	0.0280	0.0003	176	80	178	5.4	178	2.0	99			
42	37	172	459	0.37	0.0572	0.0010	0.5583	0.0103	0.0706	0.0005	502	38.9	450	6.7	440	2.8	97			
43	46	345	486	0.71	0.0557	0.0010	0.5794	0.0105	0.0753	0.0006	439	6.5	464	6.8	468	3.6	99			
44	19.7	214	556	0.38	0.0534	0.0013	0.2254	0.0059	0.0306	0.0003	346	83	206	4.9	194	2.1	93			
45	3.6	104	162	0.64	0.0528	0.0034	0.1324	0.0089	0.0181	0.0003	320	144	126	8.0	116	1.7	91			
46	12.2	154	349	0.44	0.0525	0.0016	0.2153	0.0066	0.0298	0.0003	306	70.4	198	5.5	189	1.8	95			
47	3.5	85.3	154	0.55	0.0569	0.0035	0.1418	0.0080	0.0184	0.0003	500	137	135	7.2	117	1.7	86			
48	14.4	57.9	154	0.38	0.0588	0.0020	0.6593	0.0217	0.0815	0.0009	561	72	514	13.3	505	5.2	98			
49	28.4	551	531	1.04	0.0532	0.0012	0.2938	0.0069	0.0401	0.0004	345	54	262	5.5	254	2.4	96			
50	23.8	392	659	0.60	0.0531	0.0012	0.2175	0.0053	0.0297	0.0003	332	55	200	4.4	189	1.8	94			
51	31	280	679	0.41	0.0532	0.0011	0.2919	0.0061	0.0398	0.0003	345	50.9	260	4.8	252	1.8	96			
52	12.7	122	264	0.46	0.0502	0.0015	0.2914	0.0090	0.0421	0.0004	206	36.105	260	7.1	266	2.6	97			
53	5.7	93.8	176	0.53	0.0488	0.0019	0.1797	0.0069	0.0270	0.0003	200	93	168	6.0	172	2.0	97			
54	20.1	208	569	0.37	0.0500	0.0012	0.2138	0.0049	0.0311	0.0003	195	58	197	4.1	197	1.6	99			
55	20.6	328	655	0.50	0.0504	0.0013	0.1831	0.0046	0.0263	0.0002	217	53	171	4.0	168	1.3	98			
56	31	302	639	0.47	0.0526	0.0011	0.2951	0.0060	0.0406	0.0003	322	17	263	4.7	257	1.9	97			
57	13.3	157	273	0.58	0.0537	0.0017	0.2973	0.0093	0.0402	0.0005	367	70	264	7.3	254	3.2	96			
58	3.5	90.1	161	0.56	0.0480	0.0029	0.1177	0.0068	0.0179	0.0003	98.2	141	113	6.2	115	1.9	98			
59	6.8	224	298	0.75	0.0495	0.0022	0.1221	0.0056	0.0179	0.0002	172	104	117	5.0	114	1.4	97			
60	61	145	715	0.20	0.0569	0.0010	0.6098	0.0107	0.0776	0.0006	500	38.9	483	6.8	482	3.6	99			
61	11.0	53.9	122	0.44	0.0549	0.0021	0.5798	0.0223	0.0767	0.0008	409	87	464	14.4	476	4.8	97			
62	15.4	142	317	0.45	0.0517	0.0017	0.2933	0.0089	0.0413	0.0004	272	72	261	7.0	261	2.5	99			
63	8.5	102	178	0.57	0.0534	0.0017	0.2910	0.0099	0.0394	0.0005	346	70	259	7.8	249	3.0	96			
64	9.2	96.9	195	0.50	0.0511	0.0017	0.2803	0.0097	0.0398	0.0004	256	78	251	7.7	251	2.6	99			
65	24.5	201	534	0.38	0.0522	0.0012	0.2889	0.0062	0.0401	0.0003	295	52	258	4.9	254	2.2	98			
66	3.8	92.1	184	0.50	0.0507	0.0026	0.1235	0.0060	0.0175	0.0002	228	119	118	5.4	112	1.5	94			
67	16.6	268	481	0.56	0.0518	0.0014	0.2063	0.0053	0.0288	0.0002	276	66	190	4.5	183	1.3	96			
68	6.6	119	171	0.69	0.0526	0.0020	0.2263	0.0087	0.0313	0.0004	309	87	207	7.2	199	2.5	95			
69	3.2	69.2	84.0	0.82	0.0477	0.0029	0.1977	0.0112	0.0299	0.0005	83.4	137	183	9.5	190	2.8	96			
70	11.9	192	341	0.56	0.0512	0.0017	0.2046	0.0064	0.0291	0.0004	250	76	189	5.4	185	2.2	97			
71	2.13	64.4	94.8	0.68	0.0514	0.0033	0.1337	0.0081	0.0183	0.0004	257	148	127	7.2	117	2.3	91			
72	3.7	65.3	72.2	0.90	0.0551	0.0033	0.2956	0.0177	0.0391	0.0006	417	133	263	13.9	247	3.5	93			
73	16.4	170	453	0.37	0.0504	0.0012	0.2263	0.0056	0.0325	0.0003	213	83.3	207	4.6	206	1.8	99			
74	13.2	173	335	0.52	0.0506	0.0019	0.2229	0.0255	0.0338	0.0022	233	54.6	204	21.2	214	13.8	95			
75	14.1	247	365	0.68	0.0514	0.0015	0.2220	0.0063	0.0313	0.0003	257	67	204	5.2	199	1.7	97			
76	4.3	138	192	0.72	0.0508	0.0023	0.1257	0.0059	0.0179	0.0002	232	110	120	5.3	115	1.4	95			
77	13.9	133	407	0.33	0.0500	0.0015	0.2136	0.0068	0.0308	0.0003	198	70	197	5.7	196	2.0	99			
78	3.7	121	156	0.78	0.0533	0.0026	0.1338	0.0066	0.0183	0.0003	339	108	127	5.9	117	1.9	91			
79	19.6	322	562	0.57	0.0552	0.0018	0.2206	0.0078	0.0287	0.0003	420	75	202	6.5	183	2.1	89			
80	3.4	91.5	158	0.58	0.0500	0.0030	0.1296	0.0080	0.0185	0.0003	195	138	124	7.2	118	1.9	95			
81	18.5	292	541	0.54	0.0523	0.0015	0.2061	0.0051	0.0287	0.0003	298	67	190	4.3	183	1.8	95			
82	3.3	91.8	147	0.62	0.0454	0.0028	0.1141	0.0072	0.0183	0.0003	error	110	6.5	117	1.6	93				

续表 1-4

测试点	元素含量/ 10^{-6}						同位素比值						年龄/Ma						谐和度/%
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$			
83	37	115	447	0.26	0.0559	0.0011	0.5727	0.0114	0.0743	0.0007	456	17	460	7.4	462	4.1	99		
84	22.2	169	489	0.34	0.0510	0.0012	0.2837	0.0062	0.0404	0.0003	239	56	254	4.9	255	2.1	99		
85	28.2	290	803	0.36	0.0521	0.0011	0.2219	0.0047	0.0308	0.0002	287	53	203	3.9	196	1.5	96		
86	13.5	157	369	0.43	0.0500	0.0013	0.2201	0.0053	0.0320	0.0003	195	25	202	4.5	203	1.8	99		
87	10.1	122	284	0.43	0.0516	0.0017	0.2182	0.0072	0.0307	0.0004	333	74	200	6.0	195	2.2	97		
88	16.0	76.5	200	0.38	0.0554	0.0015	0.5380	0.0146	0.0703	0.0006	428	59	437	9.7	438	3.7	99		
89	6.0	94.1	179	0.52	0.0503	0.0022	0.1941	0.0081	0.0281	0.0003	209	102	180	6.9	178	2.1	99		
90	13.6	119	376	0.32	0.0505	0.0015	0.2262	0.0068	0.0325	0.0003	217	69	207	5.7	206	1.9	99		
91	4.0	55.7	112	0.50	0.0504	0.0027	0.2123	0.0117	0.0306	0.0004	217	122	196	9.8	194	2.7	99		
92	32	313	720	0.43	0.0526	0.0010	0.2861	0.0061	0.0394	0.0004	309	44	255	4.8	249	2.5	97		
93	9.5	121	250	0.48	0.0482	0.0016	0.2180	0.0080	0.0326	0.0003	109	80	200	6.7	207	2.1	96		
94	7.0	134	205	0.66	0.0486	0.0021	0.1877	0.0075	0.0282	0.0003	128	100.0	175	6.4	179	1.7	97		
95	16.6	388	488	0.80	0.0487	0.0014	0.1842	0.0049	0.0275	0.0003	200	60.2	172	4.2	175	1.7	98		
96	7.5	133	170	0.78	0.0521	0.0022	0.2522	0.0098	0.0354	0.0004	300	99	228	8.0	224	2.2	98		
97	18.9	191	585	0.33	0.0514	0.0014	0.2060	0.0054	0.0291	0.0003	261	61.1	190	4.6	184.7	1.7	97		
98	11.8	106	349	0.30	0.0526	0.0012	0.2215	0.0051	0.0305	0.0003	309	52	203	4.3	194	1.7	95		
99	16.6	166	353	0.47	0.0555	0.0013	0.3082	0.0074	0.0402	0.0004	432	47	273	5.7	254	2.3	92		
100	14.4	140	321	0.43	0.0502	0.0014	0.2696	0.0075	0.0389	0.0003	206	97.2	242	6.0	246	2.2	98		

陷、勃利盆地西部一线发育,相当于盆地的西部边界(杨承志, 2014)。

相较于城子河组,2件猴石沟组样品的碎屑锆石年龄显示出较大差异,体现在是否含有大量早中生代锆石颗粒(图3-f, h)。鉴于采样区地层整体向南倾伏(图2),来自鹤岗盆地北部边界的样品HG200916-1应属于猴石沟组下部或底部层位,虽缺失早白垩世锆石颗粒,但依旧含有大量来自小兴安岭的早中生代锆石颗粒。相比之下,样品HG200823-1的位置更靠南,层位更靠上,其中基本缺失早中生代锆石颗粒。尽管如此,2件样品仍具有相同之处,即晚二叠世—早三叠世锆石颗粒数量显著增加,比例上升为41%~47%,同时早古生代锆石颗粒的峰值年龄亦有增加,这些均是佳木斯隆起构造抬升的有利信号。以上特征表明,随着时间推移,鹤岗盆地主要源区逐渐由西侧的小兴安岭转为南部的佳木斯隆起。结合松辽盆地物源特征,Sun et al.(2014)认为,鹤岗盆地在猴石沟组沉积期已然与西部的松辽盆地发生贯通,两者之间的小兴安岭已完全没于水下。与此同时,统一的“大三江盆地”原型也在悄然解体,内部的恒山、密山和桦南隆起初见端倪,其上部早期沉积的下白垩统逐渐被剥蚀殆尽,

成为勃利、鸡西等盆地的主要物源(温泉波等, 2008; 赵学钦等, 2012)。低温热年代学研究表明,这些被剥掉的、原本属于“大三江盆地”组成部分的下白垩统厚度可达1.6~4.8 km(Zhou et al., 2022)。

如前所述,此次盆山系统的调整过程可能发生在短期内,对应猴石沟组与下伏地层间的区域性角度不整合,标志着盆地属性由伸展断陷转为挤压挠曲。这种构造体制的快速转换与古太平洋板块俯冲方向由北西向调整为北北西向及俯冲角度由高角度转为低角度密切相关(Liu et al., 2018; Zhu et al., 2021; Feng et al., 2023)。换句话说,黑龙江东部早白垩世区域性断陷盆地的形成是大洋板块正向、高度角度俯冲引发北西—南东向弧后伸展的产物(Zhu et al., 2021),而晚白垩世初期的挤压反转则是大洋板块斜向、低角度俯冲引发区域性南—北向挤压的产物(Liu et al., 2018)。

4 结 论

(1)黑龙江东部下白垩统城子河组、穆棱组和东山组分别形成于116~111 Ma、111~107 Ma和107~105 Ma,上白垩统猴石沟组底界年龄接近104 Ma。因此,介于2套地层间的区域性不整合代表的时间

表2 猴石沟组 LA-ICP-MS 碎屑锆石 U-Th-Pb 测年结果

Table 2 LA-ICP-MS U-Th-Pb dating results of the detrital zircons from the Houzhigou Formation

测试点	元素含量/ 10^{-6}				同位素比值						年龄/Ma						谐和度/%
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	
砂岩样品HG200823-1																	
01	93	131	284	0.46	0.0624	0.0018	1.1059	0.0329	0.1286	0.0019	687	57	756	16	780	11	96
02	44	187	414	0.45	0.0542	0.0022	0.2929	0.0113	0.0397	0.0006	376	97	261	9	251	4	96
03	42	183	342	0.54	0.0556	0.0028	0.3048	0.0159	0.0397	0.0007	435	113	270	12	251	4	92
04	38	391	886	0.44	0.0493	0.0023	0.1077	0.0049	0.0159	0.0003	161	142	104	5	101	2	97
05	31	99	372	0.27	0.0537	0.0023	0.3197	0.0138	0.0432	0.0007	367	96	282	11	273	4	96
06	57	235	561	0.42	0.0544	0.0017	0.3040	0.0100	0.0404	0.0006	391	70	270	8	255	4	94
07	45	208	430	0.48	0.0511	0.0023	0.2745	0.0126	0.0392	0.0007	256	73	246	10	248	4	99
08	25	263	605	0.43	0.0523	0.0032	0.1130	0.0064	0.0160	0.0003	298	139	109	6	102	2	93
09	15	21	333	0.06	0.0542	0.0027	0.3057	0.0150	0.0412	0.0007	389	113	271	12	260	4	95
10	103	229	484	0.47	0.0609	0.0020	0.6589	0.0208	0.0787	0.0011	635	69	514	13	488	7	94
11	54	208	509	0.41	0.0554	0.0024	0.3304	0.0154	0.0431	0.0006	428	96	290	12	272	4	93
12	52	559	1048	0.53	0.0506	0.0023	0.1140	0.0047	0.0166	0.0002	233	101	110	4	106	1	96
13	19	72	202	0.36	0.0538	0.0029	0.3161	0.0165	0.0429	0.0007	361	122	279	13	271	4	97
14	47	174	557	0.31	0.0505	0.0018	0.2817	0.0099	0.0406	0.0005	220	49	252	8	256	3	98
15	120	249	518	0.48	0.0596	0.0019	0.6863	0.0227	0.0840	0.0019	587	70	531	14	520	11	97
16	83	64	306	0.21	0.0735	0.0019	1.6524	0.0422	0.1635	0.0021	1028	51	990	16	976	11	98
17	39	177	335	0.53	0.0499	0.0022	0.2835	0.0124	0.0417	0.0006	187	104	253	10	263	4	96
18	33	153	268	0.57	0.0544	0.0028	0.2885	0.0129	0.0395	0.0007	391	84	257	10	250	4	97
19	61	135	300	0.45	0.0581	0.0017	0.6375	0.0208	0.0791	0.0011	600	60	501	13	491	6	97
20	155	400	563	0.71	0.0566	0.0015	0.5966	0.0141	0.0769	0.0010	476	90	475	9	478	6	99
21	38	96	650	0.15	0.0527	0.0017	0.2994	0.0095	0.0413	0.0006	317	72	266	7	261	4	98
22	206	495	733	0.68	0.0585	0.0016	0.6540	0.0184	0.0810	0.0011	550	55	511	11	502	7	98
23	19	205	475	0.43	0.0492	0.0026	0.1087	0.0054	0.0163	0.0002	154	122	105	5	104	1	99
24	50	203	448	0.45	0.0535	0.0019	0.3100	0.0110	0.0419	0.0005	350	50	274	9	264	3	96
25	207	352	1606	0.22	0.0561	0.0012	0.5768	0.0142	0.0743	0.0013	457	44	462	9	462	8	99
26	42	98	192	0.51	0.0569	0.0020	0.6036	0.0208	0.0771	0.0011	487	76	480	13	479	6	99
27	55	264	427	0.62	0.0514	0.0018	0.2849	0.0095	0.0406	0.0005	257	84	255	8	257	3	99
28	47	93	297	0.31	0.0575	0.0019	0.6267	0.0220	0.0788	0.0011	522	74	494	14	489	7	98
29	85	204	336	0.61	0.0547	0.0017	0.6152	0.0183	0.0819	0.0011	467	73	487	12	508	7	95
30	21	214	485	0.44	0.0552	0.0027	0.1224	0.0056	0.0164	0.0003	420	107	117	5	105	2	88
31	51	232	324	0.72	0.0503	0.0021	0.2996	0.0125	0.0434	0.0007	209	98	266	10	274	4	97
32	9	39	76.3	0.51	0.0653	0.0050	0.3472	0.0225	0.0407	0.0009	785	161	303	17	257	5	83
33	24	116	163	0.71	0.0498	0.0026	0.2702	0.0133	0.0402	0.0007	187	119	243	11	254	4	95
34	16	68	177	0.38	0.0495	0.0029	0.2805	0.0167	0.0412	0.0007	172	139	251	13	261	4	96
35	32	65	198	0.33	0.0578	0.0021	0.6219	0.0217	0.0787	0.0011	524	78	491	14	488	7	99
36	33	372	757	0.49	0.0478	0.0020	0.1087	0.0048	0.0166	0.0002	100	87	105	4	106	1	98
37	25	89	324	0.27	0.0521	0.0022	0.2902	0.0123	0.0408	0.0006	300	98	259	10	258	4	99
38	33	136	373	0.36	0.0493	0.0019	0.2797	0.0103	0.0417	0.0006	161	89	250	8	263	4	95
39	38	87	206	0.42	0.0566	0.0020	0.6096	0.0224	0.0786	0.0011	476	80	483	14	488	6	99
40	46	162	602	0.27	0.0521	0.0017	0.2968	0.0095	0.0416	0.0005	300	74	264	7	263	3	99

续表 2-1

测试点	元素含量/ 10^{-6}						同位素比值						年龄/Ma						谐和度/%
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$			
41	109	214	544	0.39	0.0590	0.0018	0.6584	0.0195	0.0812	0.0011	569	67	514	12	503	7	98		
42	208	300	839	0.36	0.0631	0.0016	0.9138	0.0330	0.1039	0.0027	722	54	659	18	637	16	96		
43	32	110	319	0.34	0.0506	0.0023	0.2937	0.0129	0.0425	0.0006	233	103	261	10	268	4	97		
44	140	509	1290	0.39	0.0528	0.0015	0.2992	0.0080	0.0417	0.0008	320	63	266	6	263	5	99		
45	16	56	178	0.31	0.0573	0.0031	0.3235	0.0174	0.0420	0.0008	502	114	285	13	265	5	92		
46	16	62	137	0.45	0.0636	0.0039	0.3426	0.0186	0.0406	0.0009	728	130	299	14	257	6	84		
47	104	377	1063	0.35	0.0518	0.0015	0.2893	0.0090	0.0403	0.0006	280	65	258	7	255	4	98		
48	11	85	233	0.36	0.0620	0.0047	0.1349	0.0091	0.0165	0.0004	676	161	129	8	106	2	80		
49	22	222	477	0.47	0.0486	0.0025	0.1106	0.0055	0.0166	0.0003	128	79	107	5	106	2	99		
50	42	406	796	0.51	0.0466	0.0024	0.1057	0.0055	0.0165	0.0003	28	122	102	5	105	2	96		
51	87	214	371	0.58	0.0589	0.0017	0.5845	0.0188	0.0716	0.0010	561	68	467	12	446	6	95		
52	63	131	1171	0.11	0.0526	0.0014	0.2976	0.0094	0.0411	0.0008	322	58	265	7	260	5	98		
53	10	80	272	0.29	0.0592	0.0035	0.1322	0.0075	0.0165	0.0003	572	126	126	7	105	2	82		
54	12	23	72.6	0.32	0.0631	0.0036	0.6658	0.0371	0.0780	0.0014	709	120	518	23	484	8	93		
55	35	361	735	0.49	0.0481	0.0019	0.1078	0.0043	0.0164	0.0003	102	103	104	4	105	2	99		
56	16	48	205	0.23	0.0507	0.0024	0.2834	0.0131	0.0410	0.0006	228	111	253	10	259	4	97		
57	78	284	870	0.33	0.0510	0.0015	0.2868	0.0096	0.0407	0.0006	243	69	256	8	257	4	99		
58	58	127	192	0.66	0.0568	0.0021	0.6146	0.0238	0.0785	0.0011	483	81	486	15	487	7	99		
59	31	212	1237	0.17	0.0465	0.0018	0.0967	0.0037	0.0152	0.0003	33	89	94	3	97	2	96		
60	36	129	380	0.34	0.0507	0.0019	0.2913	0.0114	0.0416	0.0006	233	55	260	9	263	4	98		
61	20	71	248	0.29	0.0488	0.0023	0.2609	0.0123	0.0389	0.0006	139	111	235	10	246	4	95		
62	18	172	404	0.43	0.0494	0.0028	0.1103	0.0062	0.0164	0.0003	165	133	106	6	105	2	98		
63	94	388	753	0.52	0.0518	0.0018	0.2862	0.0099	0.0403	0.0007	280	86	256	8	255	4	99		
64	19	114	189	0.60	0.0520	0.0030	0.2129	0.0112	0.0305	0.0005	287	130	196	9	194	3	98		
65	90	87	1016	0.09	0.0574	0.0014	0.5904	0.0161	0.0744	0.0012	506	58	471	10	463	7	98		
66	125	127	1049	0.12	0.0592	0.0014	0.6833	0.0227	0.0837	0.0021	576	52	529	14	518	13	97		
67	9	85	288	0.30	0.0482	0.0028	0.1053	0.0062	0.0161	0.0003	106	133	102	6	103	2	99		
68	7	29	60.4	0.48	0.0586	0.0039	0.3065	0.0202	0.0390	0.0010	550	117	271	16	247	6	90		
69	18	165	441	0.37	0.0478	0.0024	0.1081	0.0054	0.0165	0.0003	87	124	104	5	106	2	98		
70	33	347	718	0.48	0.0475	0.0019	0.1030	0.0040	0.0159	0.0003	72	93	100	4	101	2	98		
71	13	112	260	0.43	0.0591	0.0035	0.1374	0.0083	0.0170	0.0003	569	130	131	7	108	2	81		
72	45	152	541	0.28	0.0500	0.0015	0.2871	0.0090	0.0416	0.0005	195	72	256	7	263	3	97		
73	15	59	171	0.35	0.0518	0.0029	0.2648	0.0142	0.0379	0.0007	276	128	239	11	240	4	99		
74	57	237	408	0.58	0.0529	0.0023	0.3167	0.0131	0.0436	0.0006	328	94	279	10	275	4	98		
75	69	148	288	0.51	0.0558	0.0016	0.6197	0.0197	0.0805	0.0011	456	67	490	12	499	7	98		
76	72	92	267	0.34	0.0676	0.0019	1.0570	0.0284	0.1138	0.0015	857	62	732	14	695	9	94		
77	48	140	443	0.32	0.0520	0.0017	0.3839	0.0132	0.0537	0.0010	287	77	330	10	337	6	97		
78	33	315	695	0.45	0.0493	0.0018	0.1097	0.0041	0.0162	0.0002	161	89	106	4	103	1	97		
79	37	375	850	0.44	0.0494	0.0020	0.1070	0.0047	0.0157	0.0003	165	88	103	4	100	2	97		
80	19	69	216	0.32	0.0552	0.0026	0.3036	0.0135	0.0407	0.0006	420	106	269	10	257	4	95		
81	44	85	251	0.34	0.0559	0.0019	0.6035	0.0207	0.0785	0.0010	450	74	479	13	487	6	98		
82	123	410	1484	0.28	0.0522	0.0013	0.2868	0.0081	0.0398	0.0006	300	59	256	6	252	4	98		

续表 2-2

测试点	元素含量/ 10^{-6}										同位素比值						年龄/Ma				谐和度/%	
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	%					
83	22	84	241	0.35	0.0508	0.0026	0.2726	0.0139	0.0391	0.0006	232	119	245	11	247	4	98					
砂岩样品HG200916-1																						
01	28	129	265	0.49	0.0527	0.0022	0.2937	0.0125	0.0408	0.0006	322	96	261	10	258	4	98					
02	25	101	265	0.38	0.0522	0.0021	0.3025	0.0129	0.0418	0.0006	295	94	268	10	264	4	98					
03	47	110	259	0.42	0.0569	0.0020	0.6043	0.0199	0.0774	0.0011	487	76	480	13	481	6	99					
04	52	238	461	0.52	0.0511	0.0019	0.2904	0.0095	0.0418	0.0007	256	81	259	8	264	4	98					
05	19	99	288	0.34	0.0551	0.0027	0.2245	0.0104	0.0302	0.0005	417	107	206	9	192	3	93					
06	51	277	285	0.97	0.0550	0.0024	0.3059	0.0129	0.0404	0.0006	413	94	271	10	255	4	93					
07	20	106	149	0.71	0.0563	0.0033	0.2781	0.0146	0.0364	0.0006	465	130	249	12	231	4	92					
08	38	200	250	0.80	0.0553	0.0028	0.2898	0.0135	0.0387	0.0007	433	145	258	11	245	4	94					
09	23	117	152	0.77	0.0568	0.0032	0.2906	0.0155	0.0377	0.0007	483	122	259	12	239	4	91					
10	86	487	1190	0.41	0.0519	0.0016	0.2101	0.0061	0.0294	0.0004	283	70	194	5	187	2	96					
11	68	136	445	0.31	0.0550	0.0017	0.5863	0.0170	0.0775	0.0011	413	69	468	11	481	6	97					
12	55	226	503	0.45	0.0619	0.0027	0.3424	0.0139	0.0410	0.0007	733	93	299	11	259	4	85					
13	17	78	128	0.61	0.0572	0.0034	0.3079	0.0162	0.0406	0.0008	502	134	273	13	256	5	93					
14	85	68	422	0.16	0.0704	0.0018	1.3587	0.0351	0.1400	0.0020	939	52	871	15	845	12	96					
15	35	156	308	0.51	0.0526	0.0023	0.3006	0.0130	0.0416	0.0006	309	98	267	10	263	4	98					
16	8	29	80	0.37	0.0690	0.0050	0.3809	0.0253	0.0425	0.0009	898	148	328	19	268	6	80					
17	27	192	311	0.62	0.0541	0.0029	0.2150	0.0108	0.0296	0.0005	376	123	198	9	188	3	94					
18	11	61	105	0.58	0.0594	0.0035	0.2728	0.0148	0.0342	0.0007	589	125	245	12	217	4	87					
19	38	262	473	0.55	0.0474	0.0021	0.1758	0.0077	0.0271	0.0004	77.9	94.4	164	7	172	2	95					
20	47	273	272	1.00	0.0519	0.0022	0.2526	0.0106	0.0355	0.0005	280	92	229	9	225	3	98					
21	23	146	244	0.60	0.0540	0.0036	0.2155	0.0125	0.0297	0.0007	372	150	198	10	189	4	95					
22	32	46	573	0.08	0.0620	0.0024	0.3442	0.0136	0.0399	0.0005	676	81	300	10	252	3	82					
23	18	74	197	0.38	0.0528	0.0024	0.2928	0.0130	0.0408	0.0006	320	104	261	10	258	4	98					
24	30	178	327	0.54	0.0545	0.0023	0.2336	0.0096	0.0312	0.0004	394	93	213	8	198	2	92					
25	41	177	380	0.47	0.0497	0.0018	0.2846	0.0106	0.0413	0.0005	189	85	254	8	261	3	97					
26	21	93	208	0.45	0.0533	0.0024	0.3046	0.0128	0.0421	0.0006	339	102	270	10	266	4	98					
27	24	129	320	0.40	0.0525	0.0025	0.2220	0.0099	0.0310	0.0004	309	106	204	8	197	2	96					
28	67	297	558	0.53	0.0513	0.0015	0.2992	0.0087	0.0422	0.0005	254	65	266	7	267	3	99					
29	8	32	72	0.44	0.0632	0.0040	0.3500	0.0210	0.0415	0.0009	717	133	305	16	262	6	84					
30	23	135	273	0.49	0.0493	0.0024	0.2285	0.0112	0.0337	0.0005	165	110	209	9	214	3	97					
31	27	160	314	0.51	0.0473	0.0021	0.1936	0.0080	0.0301	0.0004	64.9	100	180	7	191	3	93					
32	28	121	300	0.40	0.0512	0.0022	0.2838	0.0118	0.0405	0.0005	250	96	254	9	256	3	99					
33	22	155	284	0.55	0.0491	0.0024	0.1783	0.0085	0.0266	0.0004	150	111	167	7	170	2	98					
34	93	523	658	0.79	0.0514	0.0017	0.2480	0.0078	0.0354	0.0005	257	71	225	6	224	3	99					
35	24	114	568	0.20	0.0474	0.0029	0.1766	0.0107	0.0273	0.0006	78	128	165	9	174	4	95					
36	26	131	208	0.63	0.0541	0.0027	0.2788	0.0141	0.0376	0.0006	376	113	250	11	238	4	95					
37	22	74	154	0.48	0.0554	0.0022	0.3838	0.0153	0.0506	0.0008	428	95	330	11	318	5	96					
38	26	59	125	0.47	0.0566	0.0023	0.6023	0.0250	0.0772	0.0010	476	86	479	16	480	6	99					
39	77	166	490	0.34	0.0592	0.0015	0.6065	0.0154	0.0747	0.0010	576	56	481	10	465	6	96					
40	21	121	256	0.47	0.0499	0.0026	0.2040	0.0103	0.0304	0.0005	191	122	189	9	193	3	97					

续表 2-3

测试点	元素含量/ 10^{-6}						同位素比值						年龄/Ma						%
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$			
41	11	62	135	0.46	0.0635	0.0041	0.2646	0.0155	0.0313	0.0006	724	134	238	12	199	4	81		
42	57	324	866	0.37	0.0501	0.0018	0.1952	0.0066	0.0284	0.0003	198	79	181	6	180	2	99		
43	62	245	650	0.38	0.0468	0.0015	0.2692	0.0080	0.0424	0.0006	43	74	242	6	267	4	90		
44	17	97	231	0.42	0.0562	0.0028	0.2563	0.0128	0.0337	0.0006	457	111	232	10	213	4	91		
45	19	116	256	0.45	0.0558	0.0029	0.2149	0.0103	0.0288	0.0005	456	121	198	9	183	3	92		
46	23	131	244	0.54	0.0525	0.0029	0.2352	0.0122	0.0334	0.0005	309	128	215	10	212	3	98		
47	29	117	290	0.40	0.0489	0.0024	0.2698	0.0120	0.0408	0.0006	143	110	243	10	258	4	93		
48	38	68	261	0.26	0.0554	0.0020	0.6021	0.0214	0.0796	0.0011	432	81	479	14	493	7	96		
49	43	183	402	0.46	0.0554	0.0021	0.3007	0.0116	0.0394	0.0006	428	92	267	9	249	4	93		
50	16	82	236	0.35	0.0620	0.0029	0.2470	0.0108	0.0298	0.0005	672	102	224	9	189	3	83		
51	20	123	256	0.48	0.0516	0.0025	0.2088	0.0097	0.0299	0.0005	333	111	193	8	190	3	98		
52	18	124	189	0.66	0.0561	0.0029	0.2115	0.0106	0.0280	0.0005	457	115	195	9	178	3	91		
53	64	321	876	0.37	0.0534	0.0018	0.2322	0.0079	0.0317	0.0004	346	44	212	6	201	3	94		
54	28	173	355	0.49	0.0498	0.0026	0.2050	0.0107	0.0303	0.0005	187	124	189	9	193	3	98		
55	30	168	458	0.37	0.0520	0.0023	0.2089	0.0091	0.0293	0.0004	287	97	193	8	186	3	96		
56	18	77	198	0.39	0.0550	0.0028	0.3033	0.0143	0.0408	0.0006	413	113	269	11	258	4	95		
57	82	357	827	0.43	0.0541	0.0015	0.2914	0.0080	0.0393	0.0005	376	56	260	6	249	3	95		
58	56	183	353	0.52	0.0554	0.0018	0.4244	0.0141	0.0558	0.0008	428	74	359	10	350	5	97		
59	66	358	982	0.36	0.0527	0.0023	0.2237	0.0104	0.0308	0.0005	317	98	205	9	196	3	95		
60	22	118	371	0.32	0.0474	0.0023	0.1916	0.0099	0.0293	0.0005	78	111	178	8	186	3	95		
61	8	32	83	0.38	0.0651	0.0040	0.3350	0.0192	0.0392	0.0009	789	131	293	15	248	6	83		
62	19	108	231	0.47	0.0515	0.0028	0.2175	0.0118	0.0311	0.0005	265	92	200	10	198	3	98		
63	14	53	179	0.30	0.0514	0.0027	0.2742	0.0135	0.0398	0.0006	257	88	246	11	251	4	97		
64	225	496	1027	0.48	0.0559	0.0013	0.6280	0.0156	0.0817	0.0011	456	50	495	10	506	7	97		
65	42	118	533	0.22	0.0598	0.0020	0.3490	0.0130	0.0419	0.0006	598	106	304	10	265	3	86		
66	24	102	234	0.44	0.0499	0.0025	0.2696	0.0131	0.0398	0.0006	191	112	242	11	252	4	96		
67	31	188	359	0.52	0.0510	0.0024	0.2116	0.0100	0.0303	0.0005	243	111	195	8	192	3	98		
68	24	67	573	0.12	0.0468	0.0017	0.2130	0.0074	0.0334	0.0004	39	82	196	6	212	3	92		
69	37	160	382	0.42	0.0524	0.0019	0.2880	0.0104	0.0403	0.0006	302	83	257	8	254	4	99		
70	16	95	236	0.40	0.0536	0.0030	0.2132	0.0113	0.0292	0.0005	367	121	196	9	185	3	94		
71	70	330	576	0.57	0.0506	0.0016	0.2849	0.0090	0.0409	0.0005	233	74	255	7	258	3	98		
72	40	236	512	0.46	0.0466	0.0034	0.1892	0.0132	0.0299	0.0008	28	167	176	11	190	5	92		
73	19	81	189	0.43	0.0556	0.0028	0.3034	0.0147	0.0403	0.0006	435	111	269	11	255	4	94		
74	13	78	195	0.40	0.0543	0.0026	0.2171	0.0108	0.0289	0.0005	389	106	199	9	184	3	91		
75	25	151	321	0.47	0.0507	0.0022	0.2041	0.0091	0.0292	0.0004	233	102	189	8	185	3	98		
76	37	155	240	0.65	0.0566	0.0021	0.3800	0.0141	0.0492	0.0007	476	88	327	10	309	4	94		
77	30	126	288	0.44	0.0568	0.0022	0.3141	0.0127	0.0402	0.0006	483	89	277	10	254	3	91		
78	15	109	146	0.75	0.0585	0.0036	0.2101	0.0126	0.0266	0.0005	546	135	194	11	169	3	86		

跨度可能不会持续太久。

(2) 城子河组与穆棱组对应早白垩世裂陷作用的高峰时期,各盆地在此阶段已然相互连通,构成了

统一的、面积广阔的“大三江盆地”原型。此时的古地貌整体西高东低,小兴安岭成为盆地最主要的母岩源区。

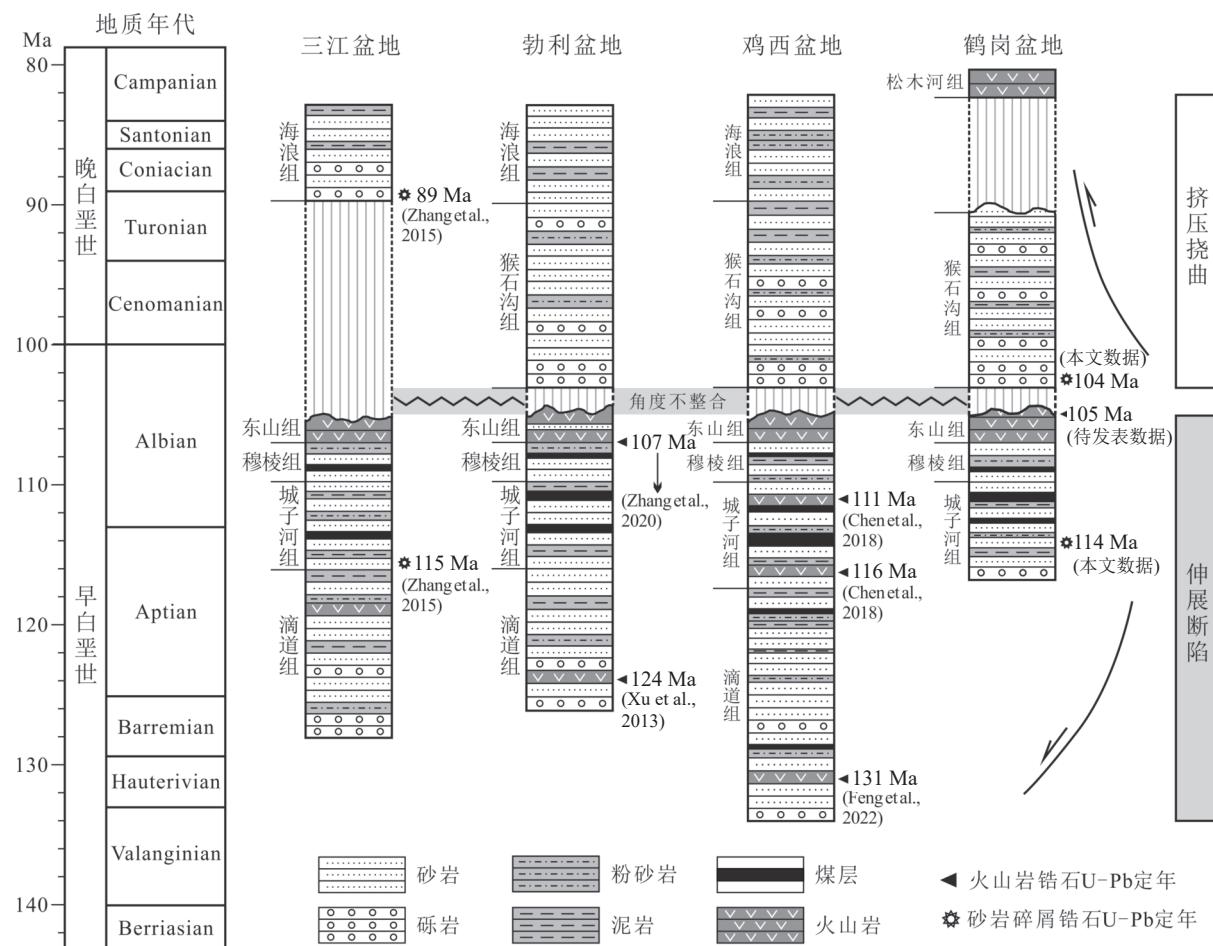


图 5 黑龙江东部白垩纪盆地地层对比与年代学格架

Fig. 5 Stratigraphic correlation and chronological framework among the Cretaceous basins in the eastern Heilongjiang province

(3)至猴石沟组时期,盆地属性发生反转,佳木斯地体开始差异性隆升,分割破坏了统一的“大三江盆地”原型。与此同时,在风化剥蚀与陆缘逆冲荷载的联合作用下,西侧小兴安岭的地貌高度显著降低,甚至没于水面之下,鹤岗盆地与松辽盆地存在贯通的可能。

References

- Chen D X, Zhang F Q, Tian Y T, et al. 2018. Timing of the late Jehol Biota: New geochronometric constraints from the Jixi Basin, NE China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 492: 41–49.
- Feng Y H, Yang T, Liang F, et al. 2022. New zircon U–Pb age of the Didao Formation in Jixi Basin and its significance for the geology and paleogeography in Jixi and eastern Heilongjiang region in the Early Cretaceous[J]. *Cretaceous Research*, 135: 105169.
- Feng Z Q, Graham S A. 2023. From foredeep to orogenic wedge-top: The Cretaceous Songliao retroforeland basin, China[J]. *Geoscience Frontiers*, 14: 101527.
- He C Q, Sun X K. 2000. Late Hauterivian dinoflagellates from the lower part of the Chengzhihe Formation in Jixi Basin, eastern Heilongjiang, NE China[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 39(1): 46–62(in Chinese with English abstract).
- Ji H L, He Z B, Qin M K, et al. 2020. Sedimentary characteristics of Lower Cretaceous Houshigou Formation in Hegang Depression, Sanjiang Basin, Heilongjiang Province[J]. *Geological Review*, 66(1): 52–68(in Chinese with English abstract).
- Jing J H, Yang H, Gao Y, et al. 2021. Petrogenesis and tectonic setting of Early Paleozoic granitoids in Linkou area, Jiamusi Block[J]. *Global Geology*, 40(3): 547–559(in Chinese with English abstract).
- Liu C, Zhu G, Zhang S, et al. 2018. Mesozoic strike-slip movement of the Dunhua–Mishan Fault Zone in NE China: A response to oceanic plate subduction[J]. *Tectonophysics*, 723: 201–222.
- Liu Y J, Li W M, Feng Z Q, et al. 2017. A review of the Paleozoic tectonics in the eastern part of Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 43: 123–148.
- Liu Z H, Mei M, Gao J Y, et al. 2014. Structural features, formation mechanism of Hulin Basin and deformation time of northeastern segment of Dunhua–Mishan fault zone in Northeast China[J]. *Journal of Jilin University*, 44(2): 480–489(in Chinese with English abstract).

- Liu Z H, Zhou F, Wu X H, et al. 2011. Coupling of Jiamusi uplift and surrounding Mesozoic–Cenozoic basins in Northeast China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(5): 1335–1344(in Chinese with English abstract).
- Ma Y F, Liu Y J, Peskov A Y, et al. 2022. Paleozoic tectonic evolution of the eastern Central Asian Orogenic Belt in NE China[J]. *China Geology*, 5(4): 555–578.
- Ren F H, Yang X P, Li Y C, et al. 2005. Chronostratigraphic division of the Jixi Group in eastern Heilongjiang province and its geological significance[J]. *Geology in China*, 32(1): 48–54(in Chinese with English abstract).
- Sha J G, Wang J P, Kirillova G, et al. 2009. Upper Jurassic and Lower Cretaceous of Sanjiang–Middle Amur basin: Non-marine and marine correlation[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52: 1873–1889.
- Sun M D, Chen H L, Zhang F Q, et al. 2014. Cretaceous provenance change in the Hegang Basin and its connection with the Songliao Basin, NE China: evidence for lithospheric extension driven by palaeo-Pacific roll-back[J]. *Geological Society London Special Publications*, 413: 91–117.
- Wang Z W, Xu W L, Pei F P, et al. 2016. Geochronology and geochemistry of early Paleozoic igneous rocks of the Lesser Xing'an Range, NE China: Implications for the tectonic evolution of the eastern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 261: 144–163.
- Wei H Y, Sun D Y, Li Y C, et al. 2012. Zircon U–Pb ages and its geological significance of the granitic rocks in the Yichun–Hegang region, southeastern Xiao Hinggan mountains[J]. *Earth Science*, 37(supplement): 50–59(in Chinese with English abstract).
- Wen Q B, Liu Y J, Li J J, et al. 2008. Provenance analysis and tectonic implications for the Cretaceous sandstones in the Jixi and Boli Basins, Heilongjiang[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 28(3): 52–59(in Chinese with English abstract).
- Wen Q B, Liu Y J, Liu B, et al. 2011. Exhumation time of Jiamusi–uplift of northeastern China constrained by ages of detrital minerals[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(2/3): 250–257(in Chinese with English abstract).
- Wilde S A. 2015. Final amalgamation of the Central Asian Orogenic Belt in NE China: Paleo–Asian Ocean closure versus Paleo–Pacific plate subduction—A review of the evidence[J]. *Tectonophysics*, 662: 345–362.
- Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, et al. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41: 1–30.
- Xu W L, Pei F P, Wang F, et al. 2013. Spatial–temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: Constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 167–193.
- Yang C Z. 2014. Comparative study on Late Cretaceous tectonic inversion of Songliao Basin–Great Sanjiang Basin and its genetic relationships[D]. Doctoral Dissertation of China University of Geosciences(Wuhan): 73–93(in Chinese with English abstract).
- Yu Y J, Zhao Z H, Li X P, et al. 2024. Geochronology, geochemistry and geological significance of early Jurassic granites in northern Zhangguangcai Mountains[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 54(4): 1224–1247(in Chinese with English abstract).
- Zhang F Q, Chen H L, Geoffrey E B, et al. 2015. Detrital zircon U–Pb geochronology and stratigraphy of the Cretaceous Sanjiang Basin in NE China: Provenance record of an abrupt tectonic switch in the mode and nature of the NE Asian continental margin evolution[J]. *Tectonophysics*, 665: 58–78.
- Zhang F Q, Chen H L, Yang S F, et al. 2012. Late Mesozoic–Cenozoic evolution of the Sanjiang Basin in NE China and its tectonic implications for the West Pacific continental margin[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 287–299.
- Zhang F Q, Dilek Y, Chen H L, et al. 2017. Structural architecture and stratigraphic record of Late Mesozoic sedimentary basins in NE China: Tectonic archives of the Late Cretaceous continental margin evolution in East Asia[J]. *Earth–Science Reviews*, 171: 598–620.
- Zhang S, Fang S, Shao H J, et al. 2020. A new zircon U–Pb age of 107.15 Ma for the Dongshan Formation, Boli Basin, Northeast China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(2): 568–571.
- Zhang X Z, Guo Z, Zeng Z, et al. 2015. Dynamic evolution of the Mesozoic–Cenozoic basins in the northeastern China[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(3): 88–98(in Chinese with English abstract).
- Zhao X Q, Yang S F, Chen H L, et al. 2012. Features of multistage Cretaceous conglomerate deposition and its palaeogeographic significance in Jixi Basin of eastern Heilongjiang, NE China[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 48(3): 419–432(in Chinese with English abstract).
- Zhou J B, Han J, Wilde S A, et al. 2013. A primary study of the Jilin–Heilongjiang high–pressure metamorphic belt: Evidence and tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 386–398(in Chinese with English abstract).
- Zhou J B, Pu X G, Hou H S, et al. 2018. 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*, 34(10): 2845–2856(in Chinese with English abstract).
- Zhou J B, Wilde S A, Zhang X Z, et al. 2009. The onset of Pacific margin accretion in NE China: Evidence from the Heilongjiang high–pressure metamorphic belt[J]. *Tectonophysics*, 478: 230–246.
- Zhou J B, Wilde S A, Zhang X Z, et al. 2011. A >1300 km late Pan–African metamorphic belt in NE China: New evidence from the Xing'an block and its tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 509: 280–292.
- Zhou J P, Dunkl I, Liu Y Q, et al. 2022. Late Cretaceous–Tertiary tectonic inversion of northeastern Asian continental margin: Insight from the low temperature thermochronology in NE China[J]. *Gondwana Research*, 102: 252–270.
- Zhou J P, Dunkl I, Liu Y Q, et al. 2023. Cretaceous source to sink system reconstruction of northeastern Asia continental margin: Insight from integrated detrital geochronology in NE China[J]. *Geoscience Frontiers*, 14: 101616.
- Zhu G, Lu Y C, Su N, et al. 2021. Crustal deformation and dynamics of Early Cretaceous in the North China Craton[J]. *Science China: Earth Sciences*, 54(12): 1873–1886.

Sciences, 64: 1428–1450.

附中文参考文献

- 何承全, 孙学坤. 2000. 黑龙江省东部鸡西盆地城子河组下部早白垩世
欧特里夫晚期海相沟鞭藻[J]. *古生物学报*, 39(1): 46–62.
- 冀华丽, 何中波, 秦明宽, 等. 2020. 黑龙江省三江盆地鹤岗凹陷下白垩
统猴石沟组沉积特征[J]. *地质论评*, 66(1): 52–68.
- 井佳浩, 杨浩, 高妍, 等. 2021. 佳木斯地块林口地区早古生代花岗质岩
石的成因及构造背景[J]. *世界地质*, 40(3): 547–559.
- 刘志宏, 梅梅, 高军义, 等. 2014. 东北东部虎林盆地的构造特征、成盆
机制及敦—密断裂带北东段的形成时代[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*,
44(2): 480–489.
- 刘志宏, 周飞, 吴相梅, 等. 2011. 东北地区佳木斯隆起与周缘中新生代
盆地群的耦合关系[J]. *吉林大学学报*, 41(5): 1335–1344.
- 任凤和, 杨晓平, 李仰春, 等. 2005. 黑龙江省东部鸡西群地层时代划分
及地质意义[J]. *中国地质*, 32(1): 48–54.
- 魏红艳, 孙德有, 叶松青, 等. 2012. 小兴安岭东南部伊春—鹤岗地区花
岗质岩石锆石 U–Pb 年龄测年及其地质意义[J]. *地球科学*, 37(增

刊): 50–59.

- 温泉波, 刘永江, 李俊杰, 等. 2008. 鸡西、勃利盆地白垩纪砂岩的物源
分析及构造意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 28(3): 52–59.
- 温泉波, 刘永江, 刘兵, 等. 2011. 碎屑矿物年代对佳木斯隆起隆升时间
的制约[J]. *地质通报*, 30(2/3): 250–257.
- 杨承志. 2014. 松辽盆地—大三江盆地晚白垩世构造反转作用对比及其
成因联系[D]. 中国地质大学(武汉)博士学位论文: 73–93.
- 于跃江, 赵忠海, 李新鹏, 等. 2024. 张广才岭北部早侏罗世花岗岩年代
学、地球化学特征及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*,
54(4): 1224–1247.
- 张兴洲, 郭治, 曾振, 等. 2015. 东北地区中—新生代盆地群形成演化的
动力学背景[J]. *地学前缘*, 22(3): 88–98.
- 赵学钦, 杨树锋, 陈汉林, 等. 2012. 中国黑龙江东部鸡西盆地白垩纪多
期砾岩特征及古地理意义[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 48(3):
419–432.
- 周建波, 韩杰, Wilde S A, 等. 2013. 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*, 29(2): 386–398.
- 周建波, 蒲先刚, 侯贺晟, 等. 2018. 东北中生代增生杂岩及对古太平洋
向欧亚大陆俯冲历史的制约[J]. *岩石学报*, 34(10): 2845–2856.