

新疆博格达地区石炭纪构造-沉积环境与盆地演化*

杨 浩¹ 李 涤¹ 何登发¹ 樊 丹^{1,2} 侯烁钦¹ 许晓龙¹ 甄 宇^{1,3}

1 中国地质大学(北京)能源学院,海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室,北京 100083

2 中国石油大庆油田有限责任公司成都勘探开发研究院,四川成都 610051

3 多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室,东北石油大学,黑龙江大庆 163318

摘 要 博格达地区位于中亚造山带的南部,发育一系列古生代大陆边缘层序、岩浆弧、增生杂岩、蛇绿岩以及中酸性侵入岩等构造-岩浆组合,是研究古亚洲洋俯冲-增生过程的天然实验室。石炭纪是新疆北部洋-陆转换的关键时期,对博格达地区石炭纪盆地形成与演化及其油气地质条件具有重要的控制作用。基于露头、钻井、地震及同位素年代学等资料,综合运用盆地构造分析方法,开展石炭纪构造-地层格架厘定、沉积充填特征刻画及构造-沉积演化研究,系统揭示了博格达地区石炭纪构造-沉积环境及盆地演化过程。结果表明:博格达地区石炭纪可划分出 4 个构造层,分别对应下石炭统维宪阶、下石炭统谢尔普霍夫阶、上石炭统巴什基尔-莫斯科阶以及上石炭统卡西莫夫-格舍尔阶;并识别出早石炭世早-中期伸展→早石炭世晚期挤压反转及晚石炭世早期伸展-晚石炭世晚期挤压反转 2 个构造旋回。盆地演化经历了早石炭世早-中期裂陷、早石炭世晚期拗陷、晚石炭世早期裂陷和晚石炭世晚期拗陷 4 个阶段,北天山洋板片回撤对早、晚石炭世伸展成盆过程具有主控作用,表现为由“早期分异”向“晚期统一”的两阶段演化。本研究有助于揭示古洋盆俯冲-增生过程中洋-陆格局转换的地质过程,并对认识复杂构造背景下含油气盆地的形成演化及其油气地质条件具有重要意义。

关键词 年代-地层格架 构造-沉积演化 原型盆地 石炭纪 博格达地区

第一作者简介 杨浩,男,1998 年生,博士研究生,地质资源与地质工程专业,主要从事盆地构造-沉积环境研究。E-mail: gbwm3@163.com。

通讯作者简介 李涤,男,1984 年生,教授,博士生导师,主要从事沉积大地构造与盆地构造研究。E-mail: lidi@cugb.edu.cn。

中图分类号: P618.130.2 文献标志码: A

Carboniferous tectono-sedimentary environment and basin evolution
in the Bogda area, NW ChinaYANG Hao¹ LI Di¹ HE Dengfa¹ FAN Dan^{1,2} HOU Shuoqin¹ XU Xiaolong¹ ZHEN Yu^{1,3}

1 School of Energy Resources, China University of Geosciences, Key Laboratory of Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Accumulation Mechanism, the Ministry of Education, Beijing 100083, China

2 Research Institute of Chengdu Exploration & Development, PetroChina Daqing Oilfield Company Limited, Chengdu 610051, China

3 National Key Laboratory of Green Development for Terrestrial Shale Oil Exploitation with Multi-Resource Synergy, Northeast Petroleum University, Heilongjiang Daqing 163318, China

* 国家自然科学基金项目(编号: U24B6001-01-01, 42172124, 42330810),国家重点研发计划项目(编号: 2023YFF0804302)共同资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (Nos. U24B6001-01-01, 42172124, 42330810) and the National Key R & D Program of China (No. 2023YFF0804302)]

收稿日期: 2025-12-01 改回日期: 2026-01-25

Abstract The Bogda area, located in the southern Central Asian Orogenic Belt, contains a suite of Paleozoic tectono-magmatic assemblages, including continental-margin successions, magmatic arcs, accretionary complexes, ophiolites and intermediate-felsic intrusions, and thus serves as a natural laboratory for investigating subduction-accretion processes of the Paleo-Asian Ocean. The Carboniferous represents a critical interval of ocean-continent transition in northern Xinjiang and exerted a first-order control on the formation and evolution of the Carboniferous basins in the Bogda area and their petroleum geological conditions. Based on outcrop observations, drilling and seismic data, and isotopic geochronology, this study applies integrated basin-tectonic analytical approaches to establish the Carboniferous tectono-stratigraphic framework, to characterize sedimentary infill patterns, and to reconstruct tectono-sedimentary evolution, thereby systematically elucidating the Carboniferous tectono-sedimentary setting and basin-evolution history of the Bogda area. The results indicate that the Carboniferous of the Bogda area can be subdivided into four tectonic units corresponding to the Visean, Serpukhovian, Bashkirian-Moscovian, and Kasimovian-Gzhelian stages. Two tectonic cycles are recognized: early-middle Early Carboniferous extension followed by late Early Carboniferous compressional inversion, and early Late Carboniferous extension followed by late Late Carboniferous compressional inversion. Basin evolution comprised four stages, including early-middle Early Carboniferous rifting, late Early Carboniferous sagging, early Late Carboniferous rifting, and late Late Carboniferous sagging. Slab rollback of the North Tianshan Ocean played a dominant role in controlling extensional basin formation during the Early and Late Carboniferous, expressed as a two-stage evolution from “early differentiation” to “late unification”. This study contributes to a better understanding of the geological processes associated with ocean-continent configuration changes during subduction-accretion of an ancient ocean basin, and provides important constraints on the formation and evolution of petroliferous basins and their petroleum geological conditions in complex tectonic settings.

Key words chrono-stratigraphic framework, tectono-sedimentary evolution, prototype basin, Carboniferous, Bogda area

About the first author YANG Hao, born in 1998, is a Ph.D. candidate specializing in geological resources and geological engineering. His primary research focuses on basin tectono-sedimentary environments. E-mail: gbwfm3@163.com.

About the corresponding author LI Di, born in 1984, is a professor and doctoral supervisor. His research focuses on sedimentary geotectonics and basin tectonics. E-mail: lidi@cugb.edu.cn.

0 前言

中亚造山带 (CAOB, Xiao *et al.*, 2015), 也称阿尔泰构造拼合带 (Altaids Tectonic Collage, Şengör *et al.*, 1993; Xiao *et al.*, 2008; Wilhem *et al.*, 2012), 夹持于东欧克拉通、西伯利亚克拉通以及华北克拉通之间, 是新元古代以来古亚洲洋 (PAO) 演化过程中各种地体 (包括蛇绿岩、岛弧、弧相关盆地、洋岛、增生杂岩、海山、可能的微大陆) 复杂拼贴的结果 (肖序常等, 1992; Jahn *et al.*, 2000; Li *et al.*, 2015)。博格达地区发育一系列古生代大陆边缘层序、岩浆弧、增生杂岩、蛇绿岩以及中酸性侵入岩 (Xiao *et al.*, 2013), 是中亚

造山带的“缩影”, 也是认识其俯冲-增生过程的理想场所 (Jahn *et al.*, 2000; Kröner *et al.*, 2014)。此外, 岩浆岩年代学与地球化学分析结果表明石炭纪是该地区洋-陆转换的关键时期, 该地区北部的克拉美丽洋与南部的北天山洋在该时期相继闭合, 到晚石炭世末期或早二叠世进入陆内演化阶段 (Han and Zhao, 2018)。前人围绕古洋盆俯冲-增生过程中洋-陆格局的转换机制开展了大量研究, 涵盖地层层序 (陶晓杨, 2019; 张磊, 2020)、火山旋回 (李涤, 2016)、岩浆岩成因 (Zhou *et al.*, 2008; Su *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2018)、沉积物源 (白建科等, 2018a) 等方面。然而, 洋-陆转

换背景下盆地的形成演化历史仍存在争议,并衍生出了多种关于石炭纪构造-沉积环境的不同认识(崔建军,2006;李涤,2016;张磊,2020;樊丹,2023)。同时,前期研究多聚焦于露头区,但露头区的地层普遍经历了造山期的强烈改造,相比之下,盆地内部保存了相对完整的地层序列,却因关注不足而鲜有报道。

博格达地区分布着中国西北地区两大重要的含油气盆地,分别是准噶尔盆地与吐哈盆地。近年来,随着深层油气勘探的开展,准噶尔盆地石炭系成为勘探的重点层系,已在五彩湾凹陷的五彩湾气田(龚德瑜等,2024)、阜康凹陷的阜26井(杨帆等,2019)、石钱滩凹陷的石钱1井(崔炳富等,2024)等获得工业性油气流,且油气主要来自于石炭系3套烃源岩层系(何登发等,2010a,2010b),分别是下石炭统滴水泉组、松喀尔苏组b段以及上石炭统石钱滩组。前人通过分析其有机碳组成、有机显微组分、镜质体反射率等有机地球化学特征,证明了这些烃源岩层系中的暗色泥岩、碳质泥岩以及凝灰质泥岩等具有良好的生烃潜力(崔炳富等,2024;龚德瑜等,2024)。然而,这些烃源岩层系形成的构造背景(如挤压环境(王淑芳等,2013;Zhang *et al.*,2013)、伸展环境(王圣柱等,2020),等)及其沉积环境(如滨海(崔炳富等,2024)、滨岸沼泽(杨帆等,2019)、浅海(崔炳富等,2024)、潟湖(王圣柱等,2020),等)仍存在争议,造成对石炭纪各时期盆地类型存在不同认识,如前陆盆地(王淑芳等,2013;Zhang *et al.*,2013)、弧内盆地(王圣柱等,2020)、裂谷盆地(王圣柱等,2020)等,且对石炭系构造演化阶段划分不统一,严重制约了对该区石油地质条件的系统认识。对于吐哈盆地,多年的油气勘探已经在侏罗系-白垩系以及古近系中获得了工业性油气流,其与准噶尔盆地具有相似的演化历程(刘俊田等,2012;甄宇等,2024),目前石炭系勘探已取得一定突破,但单个油气藏的规模仍较小。近年来,吐哈盆地勘探重点领域逐步转向石炭系海相油气藏(支东明等,2023),因此,深化对吐哈盆地油气地质条件的认识同样重要。综上所述,博格达地区石炭系不仅是研究古洋盆俯冲-增生过程中洋-陆格局转换的理想场所,也是探究复杂构造背景下含油气盆地石油地质条件形成机制的

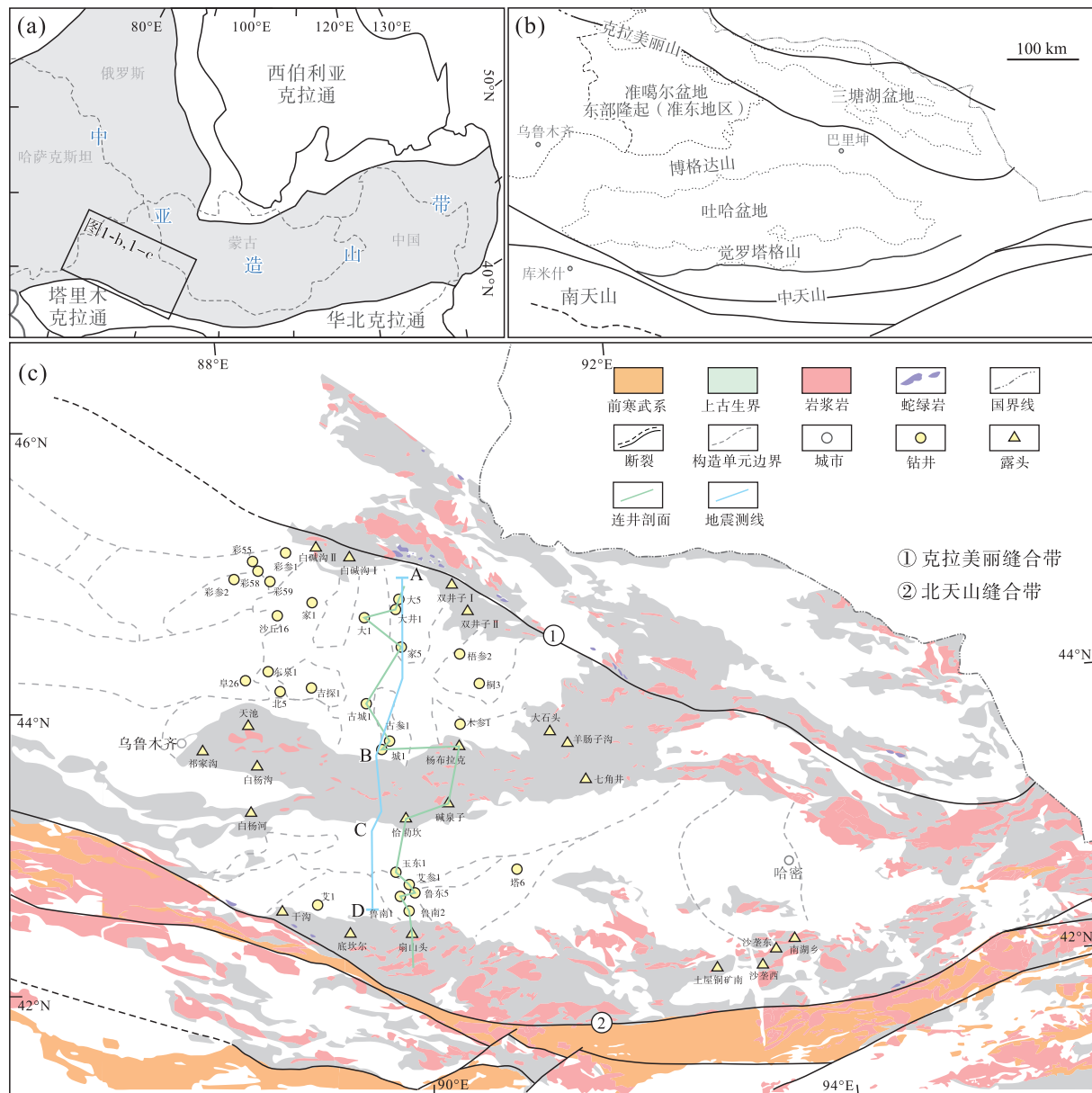
关键区域。

针对博格达地区石炭系前人已经开展了初步研究,内容包括钻井序列(李涤,2016;Li *et al.*,2020)、岩浆岩成因(李涤,2011)等,认为石炭系火山岩具有岛弧的地球化学特征(李涤,2016),产生于洋盆俯冲的构造背景下(李涤,2011),但也有一些学者认为石炭纪其已经进入到板内演化阶段,属于裂谷环境(崔建军,2006;谭佳奕等,2009)。此外,有学者从地震剖面上解析了石炭系的构造体制,并划分出不同的构造期次(Yang *et al.*,2012;李涤,2016;张磊,2020)。然而,受钻井密度、深度以及地震资料分辨率等限制,目前对石炭纪构造-地层层序演化及沉积环境等关键问题仍缺乏清晰认识。随着博格达地区石炭系油气的发现,对其勘探力度不断加大,又获取到一些高精度的地震反射资料以及深部钻井资料,这些新资料为重新认识盆地内部的地质结构、物质组成以及构造演化提供了重要依据。本研究以典型露头为基础,综合新的钻井、地震、岩心以及同位素年代学资料,将“盆-山”系统作为整体,开展区域地层对比,建立统一年代-地层格架;在年代-地层格架建立的基础上,通过“盆-山”精细地震剖面解释,明确其石炭系地质结构特征;在构造-地层格架约束下,进一步开展沉积充填剖面特征研究,揭示博格达地区石炭纪的构造-沉积环境以及盆地演化特征。

1 区域地质背景

博格达地区位于中亚造山带(CAOB)的南部(图1-a),处于塔里木板块、哈萨克斯坦板块、西伯利亚板块以及华北板块的交会部位,记录了哈萨克斯坦-准噶尔地块与北部的西伯利亚增生体系、南部的塔里木板块边缘的碰撞拼合历史。博格达地区北抵克拉美丽山,南至觉罗塔格山,主体自北向南依次涵盖准噶尔盆地东部隆起、博格达山及吐哈盆地(图1-b)。

准噶尔盆地东部隆起(通常亦称“准东地区”)位于准噶尔盆地东北部,北侧邻近克拉美丽山,南侧与博格达山及北天山构造带毗邻(图1-b),是盆地内部的重要构造高地与分区单元之一。区域上,该区处于中亚造山带西南缘,基底被普遍解释为多期俯冲-增生-拼贴作用的产



a—中亚造山带及研究区位置；b—研究区主要地理单元；c—博格达地区石炭系露头及重点井位分布图

图 1 博格达地区大地构造位置及区域地质简图（据新疆维吾尔自治区地质矿产局，1993）

Fig. 1 Sketch map showing tectonic location and regional geology of Bogda area (after Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 1993)

物，包含岛弧体系、增生杂岩/蛇绿混杂岩及相关盆地沉积单元等（Coleman, 1989; Xiao *et al.*, 2008）。在深部结构方面，大地电磁（MT）探测结果显示，准噶尔盆地中东部莫霍面埋深约 46 km，且在区域内变化于 40~55 km 之间（田少兵等，2014）。与此同时，地震反射/折射与宽角地震资料的综合建模揭示盆地内部沉积充填厚约 10 km（Zhao *et al.*, 2021）。地层与构造综合研究

进一步表明，准东地区石炭系—二叠系广泛发育火山-沉积建造，其在构造隆起与拗陷间呈现明显的空间分异与叠置关系（Li *et al.*, 2023）。此外，多项研究指出准东地区石炭纪火山岩总体以钙碱性系列为主，具有岛弧相关的岩浆作用特征，同时在部分地区亦出现双峰式/伸展相关的地球化学指示，反映俯冲增生背景下局部构造体制转换或伸展-裂谷过程的叠加（Su *et al.*, 2012; 邹国庆等，2021；

焦小芹等, 2022)。

博格达山东西向长约 350 km, 南北向宽 40 ~ 60 km, 地貌特征表现为东西走向延伸的弧形造山带, 与北西走向的依林黑比尔根山呈斜交的过渡关系。博格达山夹持于准噶尔盆地与吐哈盆地之间(图 1-b), 是两大盆地之间的重要山系分界与盆-山耦合带(Wang *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2020)。作为中亚增生造山带的重要组成部分, 博格达构造带见证了古亚洲洋俯冲、消减和闭合的整个过程。该地区广泛出露石炭系, 中-新生界则分布相对局限。关于博格达构造带属性的认识主要分为 2 类: 一类基于钙碱性系列为主的岩石组合及其弧相关地球化学特征, 认为博格达地区石炭纪岩浆作用与活动大陆边缘/岛弧体系密切相关(Xie *et al.*, 2016a, 2016b, 2016c; Zhang *et al.*, 2020); 另一类研究强调该区广泛发育双峰式岩浆岩及裂陷盆地充填序列, 倾向于将石炭纪构造环境解释为弧内/弧后伸展(裂陷)或陆内裂谷(汪晓伟等, 2015; Li *et al.*, 2020, 2022)。深地震测深综合剖面显示, 博格达山地壳厚度约为 51 km, 表现为上、中、下地壳分层, 更接近陆内地壳的结构特征(Wang *et al.*, 2003)。

吐哈盆地(即吐鲁番-哈密盆地)面积 $5.28 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是中国西北地区主要含油气盆地之一, 夹持于博格达山与觉罗塔格山之间(图 1-b)。吐哈盆地共划分为 3 个一级构造单元, 即吐鲁番坳

陷、了墩隆起和哈密坳陷(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993)。吐哈盆地基底为前寒武纪结晶变质岩系(片麻岩、片岩、混合岩等)及相关深成岩体(Zhang *et al.*, 2025)。深地震测深剖面揭示其莫霍面埋深约 49 km(Wang *et al.*, 2003)。吐哈盆地沉积盖层厚度为 9.8~10 km, 主要为石炭系-新生界, 其中石炭系为一套火山-碎屑沉积序列, 自下而上可分为小热泉子组、雅满苏组、底坎尔组以及苏穆克组。

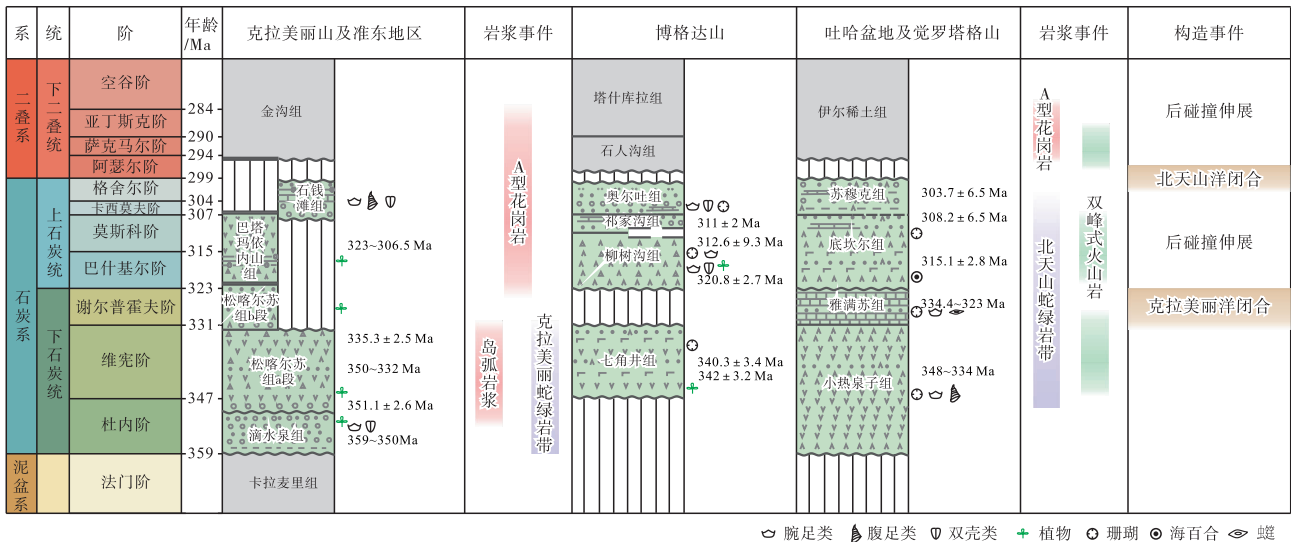
2 博格达地区石炭纪地层系统

博格达地区石炭纪火山活动强烈, 后期构造改造显著, 不同区段火山-沉积地层的岩性组合差异较大。基于此, 本研究在系统梳理岩石地层、古生物地层与同位素年代学资料的基础上, 开展地层综合对比, 建立适用于博格达地区统一的石炭纪年代-地层格架(图 2), 为后续构造-沉积演化分析及区域对比研究提供可靠的时间约束与地层依据。

2.1 克拉美丽山及准东地区

克拉美丽山及准东地区石炭系自下而上依次为下石炭统滴水泉组(C_1d)、松喀尔苏组(C_1s)及上石炭统巴塔玛依内山组(C_2b)、石钱滩组(C_2sq)。

滴水泉组(C_1d): 以灰黄色、灰绿色砾岩-砂砾岩为主, 伴生含砾粗砂岩、砂岩、碳质泥岩及煤



岩浆事件数据来源: Su *et al.*, 2010, 2012; Yang *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2013; 田健等, 2015; Tang *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2022

图 2 博格达地区年代-地层格架
Fig. 2 Chronostratigraphic framework of Bogda area

层等。该组在克拉美丽山南侧东部双井子一带以粗粒砂砾岩为主；在克拉美丽山南侧西部白碱沟地区同样以砂砾岩、砾岩为主体，并夹砂岩与泥岩层，表现为典型的粗碎屑沉积特征；向西至滴水泉地区则转为细碎屑沉积，以巨厚海相碳质泥岩为主。总体上，滴水泉组向盆地方向粒度逐渐变细，主要演化为粉砂岩、泥岩及泥质粉砂岩（李涤，2016；张磊，2020）。前人依据该区砂岩碎屑锆石最年轻年龄以及其上覆松喀尔苏组 a 段底部火山岩年龄（ 351.1 ± 2.6 Ma），将滴水泉组沉积时代约束为 359—350 Ma（图 2，Li *et al.*, 2020；杨浩等，2023）。

松喀尔苏组（ C_{1s} ）：在白碱沟地区可进一步划分为 a 段与 b 段。b 段主要为火山碎屑岩建造，自下而上由灰绿色、黄绿色凝灰质砾岩过渡为黄绿色凝灰质砂岩。a 段以中酸性火山熔岩与凝灰岩为主，并夹大量碎屑岩，发育安山玢岩、流纹岩等，同时广泛出现火山碎屑岩（凝灰岩、火山角砾岩等）。该组化石记录丰富，生物地层指示其为早石炭世。年代学结果显示，该组底部与顶部火山岩年龄分别为 351.1 ± 2.6 Ma 和 335.3 ± 2.5 Ma（图 2；Li *et al.*, 2020）。

巴塔玛依内山组（ C_{2b} ，简称巴山组）：以火山岩—火山碎屑岩组合为主，岩性总体表现为由中基性向酸性演化，间夹少量凝灰质砾岩层，安山玢岩尤为发育，底部可见珍珠岩夹层。值得注意的是，凝灰质砾岩层夹置于火山岩层内部，且区内发育一定规模的碳质页岩。在白碱沟地区，巴山组下部为较厚火山角砾岩，中部以碳质页岩为主并见煤线，富含植物化石，上部以火山岩为主，主要为流纹岩和安山玢岩。在沉积岩层（尤其碳质页岩）中，植物化石的年代跨度较大（早—中石炭世或早石炭世至晚二叠世）。近年来，火山岩年代学结果显示该组最老年龄为 ~ 323 Ma、最年轻年龄为 ~ 306.5 Ma，指示其形成时代主要为晚石炭世（图 2，Xiao *et al.*, 2011；Su *et al.*, 2012）。

石钱滩组（ C_{2sq} ）：可划分为 3 个岩性段，分别为双井子灰岩段、平梁绿色泥岩段和杂色凝灰碎屑岩段（蔡士赐，1999）。岩性组合以黄灰色、灰红色砂砾岩、灰岩、碳质泥岩及凝灰质砂岩为主。石钱滩组中部灰岩段及细碎屑段中发育大量珊瑚、腕足类及蠕类化石，鉴定为晚石炭世（图 2）。

2.2 博格达山

博格达山石炭系自下而上依次为下石炭统七角井组（ C_{1q} ）及上石炭统柳树沟组（ C_{2l} ）、祁家沟组（ C_{2q} ）和奥尔吐组（ C_{2ao} ）。

七角井组（ C_{1q} ）：可进一步划分为 4 个岩性段。第 1 段以酸性火山岩为主，发育爆发相熔结凝灰岩、熔结火山角砾岩、集块角砾岩及溢流相流纹岩；第 2 段以溢流相中基性火山岩为主，主要包括辉石安山岩、橄榄辉石玄武岩等；第 3 段为火山—沉积相组合，见沉凝灰岩，并夹灰岩透镜体；第 4 段岩性复杂，发育潜火山岩相辉绿岩，伴随溢流相玄武岩、安山岩与英安岩，以及爆发相熔结凝灰岩、火山角砾岩，局部可见火山弹，同时可见沉火山灰凝灰岩及灰岩透镜体等（新疆维吾尔自治区地质矿产局，1993），灰岩及沉凝灰岩夹层中含丰富珊瑚、腕足类化石。年代学方面，王银喜等（2006）获得七角井刺梅沟地区双峰式火山岩 Rb-Sr 年龄为 342—340 Ma；勾永东等（2023）报道了侵入七角井组的木孜德克岩体中的辉长岩与闪长岩 U-Pb 年龄分别为 299.5 ± 2.0 Ma 和 312.3 ± 2.1 Ma（图 2）。

柳树沟组（ C_{2l} ）：可划分为 3 个岩性段。下段以火山碎屑岩为主，夹少量火山碎屑沉积岩；中段以火山碎屑岩为主，夹火山碎屑沉积岩及局部火山熔岩；上段以火山熔岩与火山碎屑岩为主，夹火山碎屑沉积岩。在该组中段灰岩夹层中，采集到晚石炭世早期海相动物化石。对该组地层开展了大量年代学研究：汪晓伟等（2015）在博格达山东段芨芨台子地区获得拉斑玄武岩年龄为 312 ± 1 Ma；宋倩倩等（2020）对柳树沟组玄武岩开展 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年，获得加权平均年龄为 318.6 ± 5.2 Ma 和 312.6 ± 2.8 Ma；崔玉宝等（2023）测得侵入柳树沟组的吉木萨尔林场岩体的锆石 U-Pb 年龄为 309.7 ± 1.8 Ma；Memtimin 等（2020）在博格达山西段柳树沟地区获得该组岩浆锆石 U-Pb 年龄为 308.3 ± 4.6 Ma；Xie 等（2016b）测得天池剖面熔结凝灰岩 U-Pb 年龄为 315 ± 2 Ma、大石头剖面为 319 ± 3 Ma（图 2）。

祁家沟组（ C_{2q} ）：下部以灰色亮晶砂屑灰岩、含生屑泥晶灰岩与岩屑砂岩的不均匀互层为主；上部以灰色长石岩屑砂岩、岩屑砂岩夹钙质粉砂岩为主，局部夹凝灰岩。该组灰岩及砂岩中含腕足类、

珊瑚等化石,生物地层指示为晚石炭世。Xie 等 (2016a) 测得白杨沟剖面祁家沟组凝灰岩锆石 U-Pb 年龄为 311 ± 2 Ma (图 2)。

奥尔吐组 (C_2ao): 为一套陆源碎屑岩沉积,主要岩性为灰黑色、灰绿色粉砂岩、粉砂质细砂岩与钙质砂岩,夹少量薄层砂质灰岩及透镜状灰岩。地层中含珊瑚、腕足类、双壳类、腹足类、菊石及植物等化石,被鉴定为晚石炭世(图 2)。

2.3 吐哈盆地及觉罗塔格山

吐哈盆地及觉罗塔格山石炭系自下而上依次为下石炭统小热泉子组 (C_{1x})、雅满苏组 (C_{1y}) 及上石炭统底坎尔组 (C_2d)、苏穆克组 (C_2s)。

小热泉子组 (C_{1x}): 总体表现为火山碎屑岩-火山熔岩与正常碎屑岩互层,夹极少量生物屑灰岩的组合,由凝灰岩、角砾凝灰岩、火山角砾岩、杏仁状安山岩、安山岩、英安岩、玄武安山岩、辉石安山岩、玄武岩以及凝灰质砂岩、岩屑砂岩、长石岩屑砂岩等组成(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993)。纵向上,火山地层成层性一般,自下而上可识别出多期喷发韵律,主要包括“爆发—溢流”“爆发—溢流—间歇层”“爆发—间歇层”“溢流—间歇层”及单一爆发相火山碎屑岩等类型;局部火山岩与正常碎屑岩交替出现,反映以中酸性—中性—基性为序的正常系列火山活动。正常沉积岩相对发育区段常呈凝灰质砂砾岩—岩屑粗砂岩—细砂岩—生物屑砂屑灰岩的韵律性变化。小热泉子以北灰岩透镜体中发育腕足类、三叶虫、海百合茎及植物等化石记录。年代学方面,罗婷等 (2012) 对觉罗塔格山开展锆石 U-Pb 定年,获得东段英安岩年龄为 348.0 ± 1.7 Ma,中段英安岩年龄为 335.9 ± 2.4 Ma,西段流纹岩年龄为 334.0 ± 2.5 Ma (图 2)。

雅满苏组 (C_{1y}): 为浅海相陆源碎屑岩-碳酸盐岩-火山碎屑岩组合,夹少量火山熔岩。总体特征为下部火山碎屑岩相对发育,向上逐渐减少,而碳酸盐岩含量向上增加。西端扇头山西南一带以浅海相碳酸盐岩建造为主,主要为深灰色、浅灰色细晶灰岩与微晶灰岩,夹薄层生物碎屑灰岩和砂屑灰岩,其中生物碎屑灰岩含珊瑚、腕足类、苔藓虫、有孔虫等化石,指示其形成于早石炭世,且该地层包含下石炭统维宪阶的标准化石。已获得一系列年代学测试结果:郑加行等 (2017) 在觉罗塔格构造

带中段火山岩中获得英安岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 331.1 ± 3.4 Ma;王雯等 (2016) 报道雅满苏组英安岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 334.4 ± 1.7 Ma;崔策等 (2018) 获得阿齐山南部雅满苏组安山岩年龄为 $324.4—318.6$ Ma。本研究团队对科 1 井 2313.57 m 凝灰岩样品开展 SIMS 锆石 U-Pb 定年,获得的年龄为 327.3 ± 3.4 Ma (MSWD=1.9) (图 2;樊丹, 2023)。

底坎尔组 (C_2d): 为陆源碎屑岩夹碳酸盐沉积组合,主要由灰色、暗灰色、绿灰色岩屑砂岩、凝灰岩及灰岩组成,局部夹凝灰岩、凝灰质粉砂岩与凝灰质砂岩,含丰富动物化石。依据岩性组合特征,可进一步划分为 3 个岩性段:第 1 段由杂色底砾岩、底砂岩、灰色钙质砂岩、黄绿色岩屑砂岩、粉砂岩及灰色含生物屑灰岩组成,代表陆缘碎屑岩-碳酸盐岩沉积建造,其以超覆不整合方式覆盖于小热泉子组之上;第 2 段在区内分布相对稳定,以黄绿色中—细粒岩屑砂岩与粉砂岩互层为主,局部夹灰色钙质砂岩及砂质灰岩;第 3 段以灰色-灰绿色、黄绿色粗—细粒岩屑砂岩与粉砂岩互层为主,常夹砂质灰岩,并可见含砾粗砂岩与砾岩(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993)。该组化石丰富,第 1 段常见腕足类、珊瑚、蠕类、苔藓虫、双壳类、三叶虫、海百合茎及植物等,层位归属为中石炭统上部。年代学方面,李向民等 (2004) 在觉罗塔格地区企鹅山群中获得玄武岩锆石 U-Pb 年龄 322.6 ± 2.0 Ma、英安岩年龄 319.9 ± 1.6 Ma;白建科等 (2018b) 报道企鹅山群玄武岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $316—314$ Ma;孙天鸽 (2022) 和樊丹 (2023) 获得鲁南 1 井 3199.2 m 凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 308.2 ± 6.5 Ma (MSWD=1.7),鲁南 2 井安山岩年龄 315.1 ± 2.8 Ma (MSWD=1.5) (图 2)。

苏穆克组 (C_2s): 以碎屑岩沉积为主。下段主要为厚层灰色凝灰质砂岩与凝灰质泥岩,上段以黑色凝灰岩、深灰色凝灰质泥岩为主,并夹凝灰质砂岩。年代学方面,孙天鸽 (2022) 和樊丹 (2023) 对鲁南 1 井 2691.8 m 凝灰岩样品获得 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 304.7 ± 3.9 Ma (MSWD=3.4);对鲁南 2 井安山岩样品获得 299.2 ± 4.8 Ma (MSWD=2.5) (图 2)。

2.4 博格达地区年代-地层格架

克拉美丽山及准东地区石炭系自下而上依次为滴水泉组、松喀尔苏组 a 段、松喀尔苏组 b 段、巴山组和石钱滩组。滴水泉组沉积时代主要受其上覆地层底部火山岩年龄及砂岩碎屑锆石最年轻年龄共同约束, 为 359—350 Ma。松喀尔苏组 a 段顶、底部火山岩测年结果表明其时代为 351—332 Ma; 巴山组现有火山岩年龄将其限定为 323—306.5 Ma; 石钱滩组碳酸盐岩地层中发育晚石炭世莫斯科期蠕类与牙形石, 以及晚石炭世卡西莫夫期—格舍尔期珊瑚 (赵治信, 2009), 据此推断其时代可能为 308—299 Ma。

博格达山地区石炭系自下而上依次为七角井组、柳树沟组、祁家沟组和奥尔吐组。七角井组时代主要依据王银喜等 (2006) 获得的 Rb-Sr 年龄 342—340 Ma 进行限定。本团队对柳树沟组顶、底火山岩开展 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 获得年龄范围为 320.8—309 Ma (未发表数据), 从而约束了柳树沟组沉积时代。Xie 等 (2016a) 在白杨沟剖面测得祁家沟组底部灰岩之上的凝灰岩 U-Pb 年龄为 311 ± 2 Ma, 为该组时代提供了关键的时间标尺。奥尔吐组以晚石炭世晚期古生物组合为特征, 结合其下伏祁家沟组的年代约束, 推测其时代为 307—299 Ma。

吐哈盆地及觉罗塔格山地区石炭系自下而上为小热泉子组、雅满苏组、底坎尔组和苏穆克组。小热泉子组据前人火山岩年龄约束为 348—334 Ma; 雅满苏组火山岩年龄集中于 334.4—323 Ma; 底坎尔组现有火山岩年龄约束为 315.1—308.2 Ma; 苏穆克组火山岩年龄约束为 308.2—299.2 Ma。

综合各区地层序列及古生物—同位素年代学证据发现, 在博格达地区, 早石炭世早—中期 (~350—330 Ma) 对应滴水泉组/松喀尔苏组 a 段、七角井组及小热泉子组的沉积期; 早石炭世晚期 (~330—323 Ma) 对应松喀尔苏组 b 段与雅满苏组沉积期; 晚石炭世早期 (~320—310 Ma) 对应巴山组、柳树沟组—祁家沟组及底坎尔组沉积期; 晚石炭世晚期 (~310—300 Ma) 对应石钱滩组、奥尔吐组与苏穆克组沉积期 (图 2)。

3 博格达地区石炭系主要不整合面

在准东地区及吐哈盆地, 依据地震反射剖面特

征可识别出石炭系 3 个区域性不整合界面 (图 3), 分别为: 下石炭统与下伏地层 (前石炭系) 之间的不整合 (C_1/AnC)、上石炭统与下石炭统之间的不整合 (C_2/C_1) 以及二叠系与上石炭统之间的不整合 (P_1/C_2)。在博格达山与觉罗塔格山地区, 根据野外露头的地层接触关系, 同样识别出上述 3 个主要不整合界面 (图 3-c, 3-d, 3-f)。

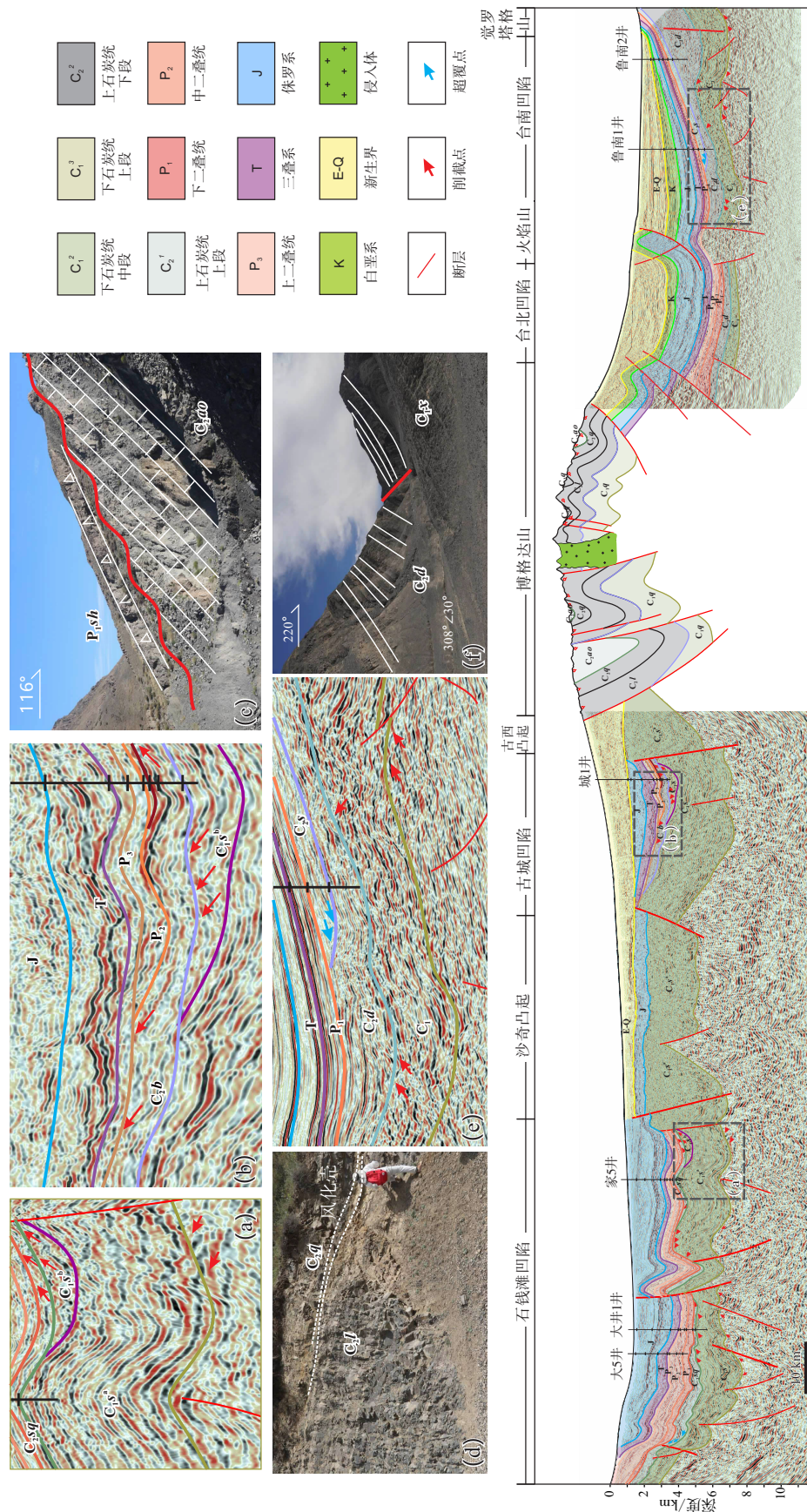
除上述区域性不整合外, 在石炭系内部还发育一系列不整合界面 (图 3), 包括: 松喀尔苏组 b 段与 a 段之间 (C_1s^b/C_1s^a , 图 3-a)、石钱滩组与松喀尔苏组 b 段之间 (C_2sq/C_1s^b , 图 3-a)、石钱滩组与松喀尔苏组 a 段之间 (C_2sq/C_1s^a , 图 3-a)、巴山组与松喀尔苏组 b 段之间 (C_2b/C_1s^b , 图 3-b)、祁家沟组与柳树沟组之间 (C_2q/C_2l , 图 3-d) 以及苏穆克组与底坎尔组之间 (C_2s/C_2d , 图 3-e)。

3.1 下石炭统与下伏地层之间

克拉美丽山石炭系与下伏地层之间的不整合多表现为滴水泉组与泥盆系卡拉麦里组之间的角度不整合 (杨浩等, 2023), 主要分布于滴水泉地区、奇台县松喀尔苏及双井子等地。前人野外调查显示, 克拉美丽地区泥盆系地层产状常近直立 (约 90°) (李涤, 2016), 而上覆石炭系产状相对低缓, 二者对比明显。在准东地区与吐哈盆地, 下石炭统与下伏地层 (前石炭系) 之间的不整合 (C_1/AnC) 在地震反射剖面上多表现为侵蚀削截, 上、下地层反射特征及产状差异显著 (图 3)。

3.2 上石炭统与下石炭统之间

克拉美丽山上石炭统与下石炭统之间的不整合 (C_2/C_1) 主要包括 2 类: 其一为下石炭统松喀尔苏组 b 段与上石炭统巴山组之间的不整合, 主要分布于白碱沟一带; 其二为下石炭统松喀尔苏组 a 段与石钱滩组之间的不整合, 主要分布于双井子一带 (杨浩等, 2023)。该界面在地震反射剖面中亦可识别 (图 3)。博格达山野外地地质调查表明, 上、下石炭统具有一定的分段差异, 其中西段祁家沟地区以晚石炭世地层出露为主, 而东段大石头地区上、下石炭统多为断层接触, 局部可见角度不整合 (孙国智, 2009)。宽沟一带可见祁家沟组与柳树沟组之间的不整合 (图 3-d)。觉罗塔格山上、下石炭统之间的不整合 (C_2/C_1) 主要位于雅满苏组



a—下石炭统松喀尔苏组 a 段与上石炭统石钱滩组之间的不整合；b—下石炭统松喀尔苏组 b 段与上石炭统巴山组之间的不整合；c—下二叠统石人沟组与上石炭统奥尔吐组之间的角度不整合（井子沟剖面）；d—上石炭统祁家沟组与柳树沟组之间的平行不整合（宽沟剖面）；e—上石炭统底坎尔苏组与上石炭统苏穆克组之间的不整合；f—上石炭统底坎尔苏组与下石炭统小热泉子组之间的不整合

图 3 博格达地区“盆—山”地质剖面及不整合细节图（剖面位置见图 1）

Fig. 3 Geological cross-section of Bogda Basin-range system with detailed unconformity (profile location shown in Fig. 1)

与底坎尔组之间（樊丹，2023）。此外，本研究在觉罗塔格山前艾丁湖南缘识别出上石炭统底坎尔组与下石炭统小热泉子组之间的低角度削截不整合，表现为底坎尔组凝灰质砂岩产状为 $308^{\circ} \angle 30^{\circ}$ ，下伏小热泉子组火山岩产状为 $330^{\circ} \angle 47^{\circ}$ （图 3-f）。结合吐哈盆地目前仅在科 1 井钻遇下石炭统，盆地地震剖面上、下石炭统之间的不整合（ C_2/C_1 ）不甚清晰，局部表现为弱削截特征，产状接近，故可归为微角度不整合（图 3）。总体而言，该不整合在克拉美丽山、博格达山中部及准东地区较为发育，在吐哈盆地及觉罗塔格山以微角度不整合为主要特征。

3.3 上石炭统与二叠系之间

在克拉美丽山西段白碱沟地区，上石炭统与二叠系多为断层接触（Su *et al.*, 2012），在东段双井子地区，两者以角度不整合接触为主。盆地地震剖面显示，石钱滩组与下二叠统之间多呈削截不整合，巴山组与中二叠统之间多呈超覆不整合，巴山组与上二叠统之间则以削截不整合为特征（图 3）。

博格达山野外资料显示，西段达坂城一带石炭系与二叠系多为平行不整合接触，而东段大石头—七角井一带，上石炭统与二叠系之间产状差异显著，为角度不整合（孙国智，2009）。本研究在博格达山井井子沟地区识别出上石炭统奥尔吐组与下二叠统石人沟组之间的不整合（图 3-c）。在吐哈盆地，上石炭统苏穆克组与二叠系之间主要表现为削截不整合，上、下地层产状差异明显（图 3）。

4 博格达地区“盆-山”地质结构

南北向 A-B 剖面自北向南依次穿过石钱滩凹陷、沙奇凸起、古城凹陷及古西凸起 4 个构造单元，并在南端终止于博格达山（图 1）。剖面内石炭系主要包括下石炭统松喀尔苏组 a 段与 b 段、上石炭统巴山组及石钱滩组。在石钱滩凹陷，松喀尔苏组 a 段沿剖面南、北两段表现出明显差异的构造样式：凹陷南部受侏罗纪期断裂活化及逆冲改造影响，地层发生抬升并强烈变形，表现为明显减薄；凹陷北部位于断层下盘，地层保存相对完整。该阶段整体以伸展断裂活动为主，发育由多条正断层控制的断陷盆地，呈典型地堑—半地堑构造样式。剖面最北侧发育一条新生代活动断裂，对地层连续性

产生破坏并造成局部减薄。在沙奇凸起区，松喀尔苏组 a 段以掀斜块体—地堑（或半地堑）构造为特征，地层厚度整体较石钱滩凹陷大。两侧控盆断裂在该组沉积期以正断层性质活动，控制地层向断层侧加厚；后期转化为逆断层并导致地层抬升、剥蚀，从而在地层序列上形成明显缺失，缺失层位可上延至前侏罗系。在古城凹陷内，松喀尔苏组 a 段厚度最大，并在断裂邻近部位表现为向断层侧加厚的生长地层特征；其南部边界断层早期为正断层活动，侏罗纪发生反转，导致北侧古西凸起区缺失较大厚度的地层序列。松喀尔苏组 b 段在剖面上主要表现为同沉积期生长地层，集中发育于石钱滩凹陷南部及古城凹陷南部，指示其沉积受构造控制显著；综合其几何形态与变形特征，该阶段为以挤压—反转作用为主的构造背景。巴山组在剖面内仅于古城凹陷残留保存。石钱滩组主要发育于石钱滩凹陷，构造活动相对减弱，表现为拗陷（沉降）阶段特征，盆地中心沉积厚度略有增加（图 3）。

博格达山以广泛出露石炭系并伴有少量二叠系为特征，其中二叠系主要分布于博格达山南、北两侧，且西段较东段更为发育。总体上，博格达山地层产状较陡，构造样式以北坡发育南倾逆断层、南坡发育北倾逆断层及大型褶皱变形为主（樊丹，2023；Zhen *et al.*, 2024）。

南北向 C-D 剖面自北向南依次穿过台北凹陷、火焰山、台南凹陷及觉罗塔格山（图 1）。由于吐哈盆地早石炭世地层内部地震反射结构不清晰、可追踪反射界面较少，本研究解释时将下石炭统作为一个整体处理；晚石炭世地层主要对应苏穆克组与底坎尔组。地震剖面显示，各构造单元整体以单斜构造形态为主。台北凹陷段中—上二叠统不发育。火焰山具有显著的分层滑脱变形特征，发育北西倾向的大型逆冲断层系，向深部断层几何形态收敛并滑脱于侏罗系底界；断层上盘侏罗系被推覆至地表，并在浅部伴生反冲断层，形成典型的断背斜（断层相关褶皱）构造样式。台南凹陷整体表现为向斜构造，其石炭系及邻近层序普遍发育 3 套主要不整合接触关系：下石炭统与下伏地层之间的削截不整合、上石炭统与下石炭统之间的低角度削截不整合以及下二叠统与上石炭统之间的低角度削截不整合。此外，台北凹陷段下石炭统与上石炭统地层受断裂切割明显，断裂为正断层性质，其上端点终止

于上石炭统底坎尔组内部,表明该区石炭系沉积-构造格局在一定程度上受伸展断裂活动控制。

5 博格达地区石炭系沉积充填特征

博格达地区位于中亚造山带中南部,处于西伯利亚克拉通与华北—塔里木克拉通之间,古构造-沉积格局受中亚造山带整体演化过程约束。早石炭世晚期,克拉美丽洋盆关闭及相关造山作用导致克拉美丽断裂北部蛇绿混杂岩带与北部阿尔泰地块发生拼合。至晚石炭世早期,北天山洋板片回撤引发区域再次进入海相/陆相的火山-沉积作用阶段,形成以火山岩、火山碎屑岩及陆源碎屑岩为主的火山-沉积建造。上述 2 期关键构造-热事件共同控制了研究区石炭系的两大构造-地层层序,即早石炭世层序与晚石炭世层序。

本研究为了揭示石炭纪沉积充填特征,建立了连井剖面(图 4)。该剖面自北向南依次穿过石钱滩凹陷、黄草湖凸起、古西凸起、古城凹陷、博格达山中段、台南凹陷以及觉罗塔格山。

早石炭世早期的滴水泉组仅在家 5 井钻遇,岩性以火山碎屑岩夹细粒碎屑岩为主,沉积环境为滨浅海相。在博格达山则表现为火山-碎屑沉积组合,以安山岩、凝灰岩为主,夹薄层砂岩,指示半深海环境。早石炭世中期的松喀尔苏组 a 段在大井 1 井、大 1 井及家 5 井钻遇,主要为基性—中基性—酸性火山熔岩夹细粒碎屑岩沉积,细碎屑岩包括泥质粉砂岩、粉砂质泥岩及泥岩等,以浅海相为主。在觉罗塔格山以火山碎屑沉积为主。

早石炭世晚期在克拉美丽山与准东地区对应松喀尔苏组 b 段沉积期,连井剖面内仅城 1 井钻遇,以细粒碎屑岩为主,夹安山岩与凝灰岩,沉积环境为滨海。博格达山同期对应七角井组 b 段,为火山-碎屑沉积组合,碎屑组分粒度偏细,以泥质粉砂岩、凝灰质砂岩为主,指示半深海相。觉罗塔格山地区同期对应雅满苏组,岩性以碳酸盐岩为主,沉积环境为浅海。

晚石炭世早期对应于准东地区的巴山组沉积期,在古城 1 井与城 1 井钻遇火山-碎屑沉积组合,底部以中基性火山岩为主,向上过渡为酸性火山岩。博格达山同期对应柳树沟组与祁家沟组,整体为火山-碎屑沉积,沉积物粒度较细,以泥岩、粉砂岩为主;火山岩主要集中于下部(对应柳树沟

组),沉积环境以浅海为主。吐哈盆地内艾参 1 井、鲁东 5 井、鲁南 1 井与鲁南 2 井均有钻遇,除鲁南 2 井外,多为细粒碎屑岩沉积(泥岩或砂质泥岩),而鲁南 2 井为巨厚火山碎屑岩层,夹凝灰质泥岩与凝灰质粉砂岩,沉积环境仍以浅海为主。在觉罗塔格山对应于底坎尔组,以火山岩夹火山碎屑沉积为特征。

晚石炭世晚期在准东地区对应石钱滩组沉积,整体表现为自下而上粒度变细的旋回,其中早期以粗碎屑陆相沉积为主,晚期转为细粒碎屑沉积,形成于相对还原的滨海环境中。博格达地区同期对应奥尔吐组,主要为碎屑岩沉积,其中恰勒坎剖面粒度最细,可见整套砂质泥岩,指示该组总体为滨海相。觉罗塔格山及吐哈盆地同期主要对应苏穆克组,以粗碎屑沉积为主,沉积相亦为滨海相(图 4)。

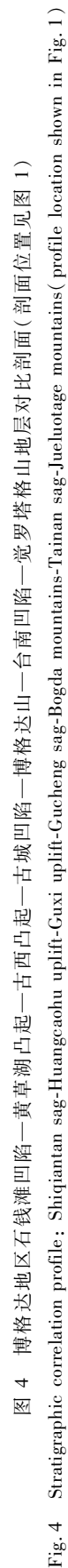
6 讨论:博格达地区石炭纪构造-沉积环境

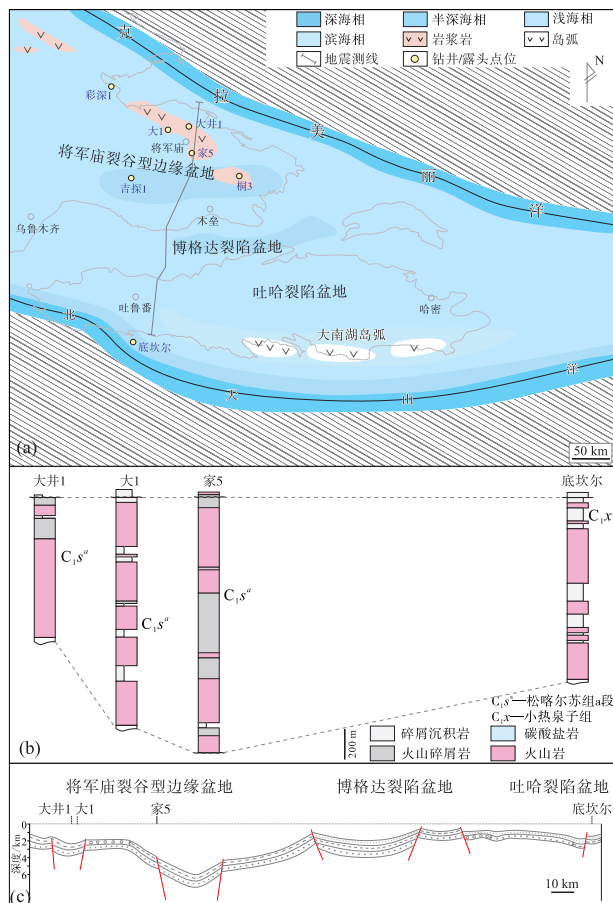
博格达地区位于中亚造山带南部关键部位,自北向南依次包括克拉美丽山、准东地区、博格达山、吐哈盆地与觉罗塔格山(图 1-b)。该区处于多洋盆俯冲-增生与陆内改造的叠加作用区,其晚古生代构造-沉积演化总体受北侧克拉美丽洋俯冲-增生体系及南侧北天山洋俯冲-增生体系的共同控制。博格达地区作为天山北缘的重要构造带,记录了中亚造山带晚古生代从俯冲汇聚向碰撞后伸展/反转转换的关键过程(Chen *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2018; Memtimin *et al.*, 2020)。

本研究基于岩石地层、古生物地层以及同位素年代学资料,建立了博格达地区石炭纪年代-地层格架。在此基础上,综合大地构造背景、连井剖面沉积相分析以及“盆-山”地质结构特征,复原了博格达地区早石炭世早—中期、早石炭世晚期、晚石炭世早期及晚石炭世晚期共 4 期构造-沉积环境(图 5-a; 图 6-a; 图 7-a; 图 8-a)。此外,对博格达地区代表性“盆-山”地质剖面开展构造复原(平衡恢复),重建了各期构造变形过程,并据此恢复 4 期对应的盆地充填样式与空间展布特征(图 5-c; 图 6-c; 图 7-c; 图 8-c)。

6.1 早石炭世早—中期 (~350—330 Ma)

在早石炭世早—中期(对应滴水泉组/松喀尔



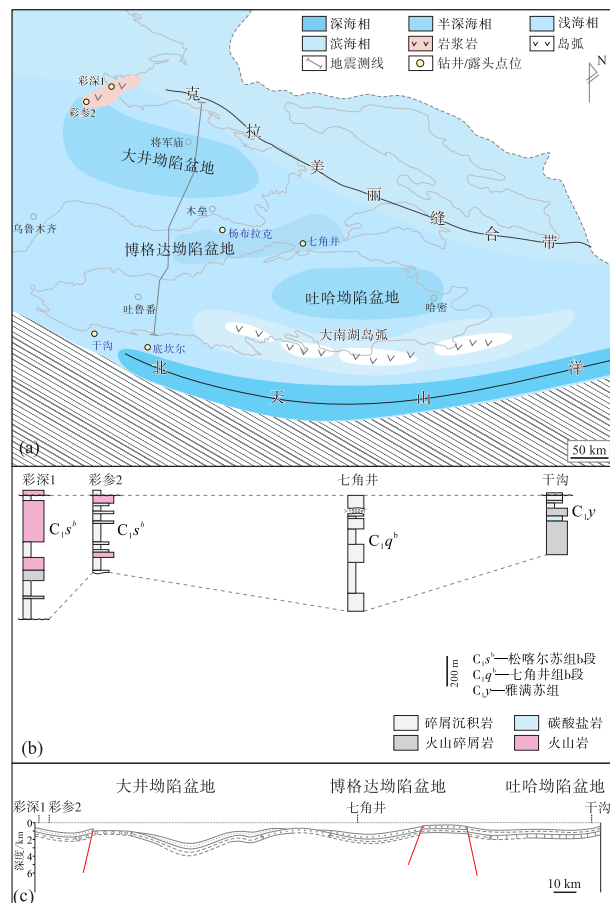


a—博格达地区构造-沉积环境平面图；b—早石炭世早—中期典型井/露头剖面简图；c—借助地震平衡剖面恢复的博格达地区早石炭世早—中期构造-沉积演化剖面

图 5 博格达地区早石炭世早—中期构造-沉积环境

Fig. 5 Tectono-sedimentary environment in Bogda area during the early-middle Early Carboniferous

苏组 a 段、七角井组 a 段及小热泉子组的沉积时期)，研究区南侧受控于北天山洋向南俯冲体系板片回撤的构造背景 (Bazhenov *et al.*, 2003; Choulet *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2021)。受弧后拉张作用的影响，研究区普遍发生显著的伸展变形，进而形成了吐哈裂陷盆地与博格达裂陷盆地。这一构造演化过程与博格达—吐哈地区晚古生代伸展体制的区域对比研究结果 (Li *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2020) 高度一致。研究区北侧，克拉美丽洋盆呈北向俯冲构造格局 (白建科等, 2018a; Huang *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2022)，而南侧受俯冲体系影响相对较弱，伸展作用不显著，主要发育了将军庙裂谷型边缘盆地。整体来看，博格达地区以海洋沉积环境为主，南部发育典型的“沟—弧—盆”



a—博格达地区早石炭世晚期构造-沉积环境平面图；b—早石炭世晚期典型井/露头剖面简图；c—借助地震平衡剖面恢复的博格达地区早石炭世晚期构造-沉积演化剖面

图 6 博格达地区早石炭世晚期构造-沉积环境

Fig. 6 Tectono-sedimentary environment in Bogda area during the late Early Carboniferous

构造体系 (大南湖岛弧体系)。从不同地区的地层响应来看，南部觉罗塔格山一带的小热泉子组主要由海相火山岩和火山碎屑岩组成，夹少量薄层砂岩；中部博格达山东段七角井组 a 段表现出明显的垂向演化特征，下部为细粒碎屑岩，中—上部则为厚层火山岩与火山碎屑岩，反映出火山物质供给与陆源碎屑输入之间的阶段性变化，指示其为拉张背景下裂陷盆地的沉积响应；北部准东地区松喀尔苏组 a 段则主要由中基性火山岩夹薄层泥质粉砂岩构成，反映了裂陷盆地控制下的火山-沉积组合体系 (Li *et al.*, 2020)。构造复原分析结果表明，吐哈裂陷盆地的水体较浅，博格达裂陷盆地的水深相对较大，将军庙裂谷型边缘盆地的水体深度接近博格达裂陷盆地，最大水深区域位于博格达裂陷盆地与

将军庙裂谷型边缘盆地之间。

6.2 早石炭世晚期 (~330—323 Ma)

早石炭世晚期 (对应松喀尔苏组 b 段、七角井组 b 段与雅满苏组沉积时期), 北天山洋盆岩石圈板片回撤作用减弱 (Li *et al.*, 2021), 且克拉美丽洋已经闭合 (杨浩等, 2023), 使得整个博格达地区由伸展体制进入弱伸展/热沉降体制的构造转换, 为主要的拗陷发育期, 发育吐哈拗陷盆地、博格达拗陷盆地以及大井拗陷盆地 (图 6)。在沉积响应方面, 南部觉罗塔格山的下石炭统雅满苏组以碎屑岩-碳酸盐岩沉积序列为主, 局部夹有少量火山岩, 沉积环境以浅海为主, 反映了构造稳定期海进背景下典型的台地-缓坡沉积体系特征。博格达山地区同期海侵加剧, 导致水体进一步加深, 在七角井剖面中发育出一套厚度稳定、岩性均一的浅海相细粒碎屑沉积组合 (孙国智, 2009), 指示水体能量相对较低、沉积速率较缓, 属于典型的拗陷盆地充填相。在准东地区, 松喀尔苏组 b 段主要表现为一套细粒碎屑岩沉积序列, 构成以泥岩、粉砂岩为主的稳定沉积组合, 显示其处于相对远离物源区的低能环境中; 而在克拉美丽山地区, 该组则发育粗碎屑沉积, 包括砾岩、粗砂岩等, 构造层理明显, 表明物源接近、沉积快速, 与前陆盆地早期充填特征相符, 可能与造山带抬升及构造加载有关 (Jiang *et al.*, 2015; Memtimin *et al.*, 2020)。

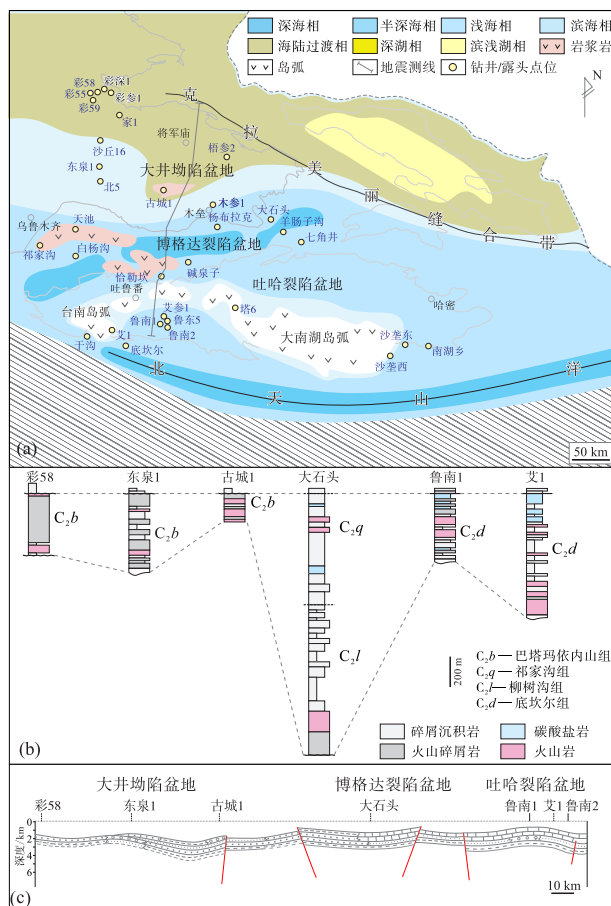
6.3 晚石炭世早期 (~320—310 Ma)

在晚石炭世早期 (对应巴山组、柳树沟组/祁家沟组以及底坎尔组的沉积时期), 研究区处于显著的构造分异阶段, 整体呈现“北挤南张、北陆南海”的构造格局 (Li *et al.*, 2020)。本阶段发育吐哈弧后盆地、博格达裂陷盆地与大井拗陷盆地, 构造性质表现为强烈的区域性伸展断陷作用, 是研究区断陷盆地系统发育的重要时期 (Tang *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2018)。该时期北部克拉美丽洋已经闭合, 北天山地块拼贴基本完成, 博格达地区南部进入伸展拉张的陆内演化阶段, 标志着由洋壳俯冲—拼贴向大陆内裂陷环境的过渡 (Memtimin *et al.*, 2020)。克拉美丽山前地区沉积了一套厚度约 2000 m 的中酸性火山岩 (巴山组), 主要岩性包括灰色至灰紫色安山玢岩、杂色流纹岩和火山角砾岩, 反映了陆相或海陆过渡环境中火山喷发活动

强烈 (Wali *et al.*, 2018)。准东地区在大井 1 井、家 1 井、梧参 2 井等钻孔中也均钻遇巴山组火山岩, 岩性以安山岩、玄武岩及凝灰岩为主, 夹含凝灰质砂岩, 色调以红褐色、灰褐色氧化色系为主, 指示火山-碎屑混合沉积过程, 整体呈现自东向西由海相向海陆过渡相的转变趋势。吐哈盆地整体处于浅海环境, 向北逐渐过渡至博格达地区的半深海沉积。代表性剖面如博格达地区祁家沟剖面, 记录了完整的火山-沉积演化序列: 柳树沟组下段主要为火山岩夹粗碎屑沉积组合, 包括灰黑色安山岩、灰绿色安山岩及黄色含砾粗砂岩、砾岩/砂砾岩, 显示出滨海火山溢流相特征; 上段为火山岩夹细粒碎屑岩, 包括安山玢岩、火山角砾岩、凝灰质粉砂岩及泥岩, 为浅海火山溢流相沉积 (Carroll *et al.*, 1995); 上覆祁家沟组主要为细碎屑沉积, 并在底部与顶部发育一套碳酸盐岩, 指示相对稳定的浅海沉积环境。此外, 结合磁异常剖面 (樊丹, 2023) 对大南湖地区的岛弧形态进行了精细刻画, 揭示其在盆地内部呈东西向展布特征, 在吐哈盆地内部仍可延伸至台南凹陷一带 (图 7)。

6.4 晚石炭世晚期 (~310—300 Ma)

晚石炭世晚期 (对应石钱滩组、奥尔吐组与苏穆克组的沉积时期), 区域构造格局总体表现为南侧北天山洋已经闭合, 俯冲作用明显减弱, 局部可能仍保留残余俯冲—消减过程; 北侧克拉美丽洋盆已闭合并进入碰撞—后碰撞转换阶段, 区域动力学背景由活动大陆边缘逐步过渡为碰撞后伸展/拗陷沉降占优的盆地发育阶段 (Li *et al.*, 2020; Tang *et al.*, 2022)。在该构造背景下, 博格达地区形成并发育吐哈拗陷盆地、大井拗陷盆地及博格达裂陷盆地等一系列盆地单元, 沉积体系总体表现为滨浅海。准东地区石钱滩组发育滨浅海相碎屑岩-碳酸盐岩沉积组合; 博格达山以祁家沟剖面为代表, 发育奥尔吐组浅海碳酸盐岩 (并常与陆源细碎屑岩互层), 指示台地—浅海外陆架环境下的碳酸盐沉积作用较为活跃; 吐哈盆地整体处于滨浅海环境, 大南湖岛弧体系逐渐收缩消减, 沉积物以粗碎屑岩与细碎屑岩混杂堆积为主, 夹火山岩与火山碎屑岩, 反映出水体变化频繁, 并伴随一定的火山活动, 沉积环境以滨海为主。总体而言, 准东地区受博格达海槽 (或裂谷深水带) 影响, 水体相对较



a—博格达地区晚石炭世早期构造-沉积环境平面图；b—晚石炭世早期典型井/露头剖面简图；c—借助地震平衡剖面恢复的博格达地区晚石炭世早期构造-沉积演化剖面

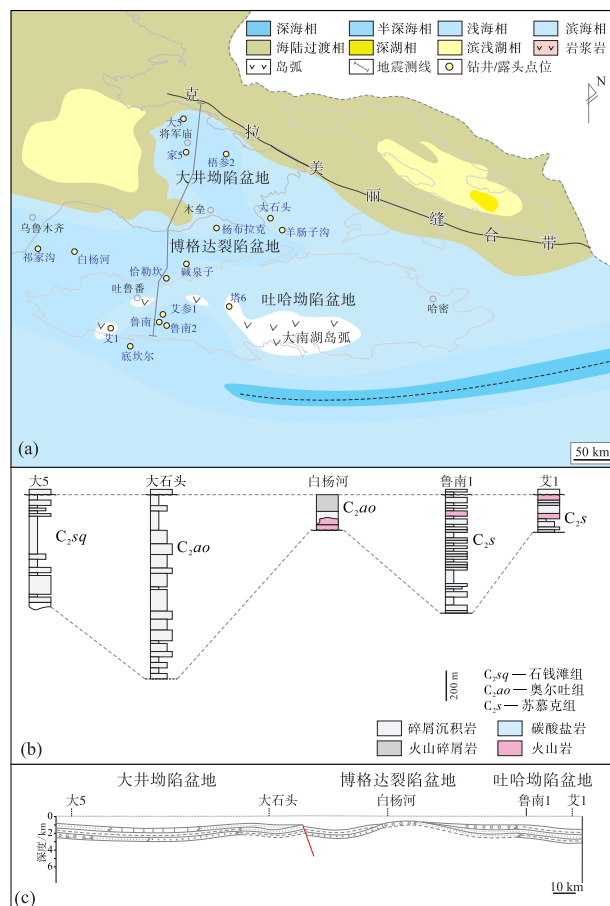
图 7 博格达地区晚石炭世早期构造-沉积环境

Fig. 7 Tectono-sedimentary environment in Bogda area during the early Late Carboniferous

深并可向博格达山延伸连通，整体以浅海外陆架—较深水细粒沉积为主，而吐哈盆地受弧—盆体系影响，更多体现为滨海相特征(图 8)。

6.5 石炭纪构造-沉积演化

博格达地区石炭纪盆地演化可概括为 2 幕较为清晰的“伸展断陷—收敛调整(拗陷沉降)”构造-沉积旋回。第 1 幕发生于早石炭世早—中期，区域伸展作用强烈，盆地以断裂控制的断陷/裂陷活动为主，伴随高强度火山活动，形成多期火山岩与火山碎屑岩建造；同期少量碎屑沉积以薄层或夹层形式产出于火山-火山碎屑序列中，反映沉积供给与火山喷发/构造活动的强耦合关系，并指示盆地演化受南、北两侧洋盆俯冲-增生体系的动力学控制。至早石炭世晚期，随着北部克拉美丽洋盆逐



a—博格达地区晚石炭世晚期构造-沉积环境平面图；b—晚石炭世晚期典型井/露头剖面简图；c—借助地震平衡剖面恢复的博格达地区晚石炭世晚期构造-沉积演化剖面

图 8 博格达地区晚石炭世晚期构造-沉积环境

Fig. 8 Tectono-sedimentary environment in Bogda area during the late Late Carboniferous

步闭合，区域构造体制由强伸展向收敛调整过渡，博格达地区转入以拗陷沉降为特征的盆地发育阶段，沉积建造随之由火山碎屑沉积为主转变为碎屑岩-碳酸盐岩，整体仍以浅海相沉积体系为主。第 2 幕主要发生于晚石炭世早期，盆地再次经历显著的伸展断陷事件，准东一带以海陆过渡相的火山-碎屑沉积组合为特征，表现为火山物质输入增强与碎屑沉积相带的快速侧向变化。到晚石炭世晚期，区域主要洋盆俯冲作用基本结束，伸展作用明显减弱，盆地整体回归由拗陷沉降主导的演化阶段，沉积体系趋于稳定并以滨浅海沉积为主。

7 结论

1) 博格达地区石炭纪可划分为 4 个构造层，

分别对应下石炭统维宪阶、下石炭统谢尔普霍夫阶、上石炭统巴什基尔—莫斯科阶、上石炭统卡西莫夫—格舍尔阶;并识别出2个主要构造旋回:早石炭世早—中期伸展→早石炭世晚期挤压反转,晚石炭世早期伸展→晚石炭世晚期挤压反转。

2) 博格达地区盆地演化从早到晚依次经历早石炭世早—中期裂陷、早石炭世晚期拗陷、晚石炭世早期裂陷以及晚石炭世晚期拗陷4个阶段,沉积充填与构造活动密切耦合,体现出伸展成盆与后期挤压反转的阶段控制。

3) 北天山洋板片回撤对早、晚石炭世的伸展成盆过程起主控作用,使盆地演化表现为从“早期分异”到“晚期统一”的两阶段格局。该认识有助于解释古亚洲洋俯冲—增生背景下的洋—陆格局转换,并为解析博格达地区石炭纪含油气盆地形成演化与油气地质条件评价提供依据。

致谢 感谢中国石油新疆油田分公司和吐哈油田分公司为本文提供了宝贵的资料。感谢2位匿名审稿专家提出的宝贵意见和建议。

参考文献 (References)

- 白建科,陈隽璐,朱小辉,冯博. 2018a. 准噶尔盆地东北缘卡拉麦里组物源区特征:碎屑岩地球化学及锆石 U-Pb 年代学的制约. 地球科学, 43(12): 4411-4426. [Bai J K, Chen J L, Zhu X H, Feng B. 2018a. Provenance characteristics of Kalamaili Formation in northeastern margin of Junggar Basin: constraints of geochemistry and detrital zircon U-Pb geochronology. *Earth Science*, 43(12): 4411-4426]
- 白建科,刘池洋,张少华,卢进才,孙吉明. 2018b. 东天山吐哈盆地南缘企鹅山群玄武岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其对北天山洋闭合时限的约束. 岩石学报, 34(10): 2995-3010. [Bai J K, Liu C Y, Zhang S H, Lu J C, Sun J M. 2018b. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of basalts from the Qi'eshan Group in the southern Turpan-Hami Basin, East Tianshan: constraints on closure time of the North Tianshan Ocean. *Acta Petrologica Sinica*, 34(10): 2995-3010]
- 蔡士赐. 1999. 新疆维吾尔自治区岩石地层. 湖北武汉: 中国地质大学出版社, 1-430. [Cai T C. 1999. Lithostratigraphy of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Wuhan, Hubei: China University of Geosciences Press, 1-430]
- 崔炳富,孔令华,陈军,张大勇,梁辉,李书凯,郭望. 2024. 准噶尔盆地东部石钱滩凹陷石炭系石钱滩组烃源岩特征及其生烃潜力分析. 西北地质, 57(2): 34-45. [Cui B F, Kong L H, Chen J, Zhang D Y, Liang H, Li S K, Guo W. 2024. Characteristics and hydrocarbon generation potential for source rock of Carboniferous Shiqiantan Formation in Shiqiantan Depression, eastern Junggar Basin. *North-western Geology*, 57(2): 34-45]
- 崔策,于介江,杨万志,张元厚,崔亚川,于介禄. 2018. 新疆东天山觉罗塔格带阿奇山南部雅满苏组火山岩的年代学、地球化学特征及其成因. 世界地质, 37(1): 88-104. [Cui C, Yu J J, Yang W Z, Zhang Y H, Cui Y C, Yu J L. 2018. Geochronology, geochemistry and genesis of Yamansu Formation volcanic rocks of southern Aqi Mountain in Jueluotage tectonic belt, eastern Tianshan of Xinjiang. *Global Geology*, 37(1): 88-104]
- 崔建军. 2006. 东疆地区后峡—博格达石炭纪盆地分析. 长安大学硕士学位论文. [Cui J J. 2006. Analysis of the Carboniferous Houxia-Bogda Basin in Eastern Xinjiang. Masteral dissertation of Changan University]
- 崔玉宝,李旭,王新录,朱国栋. 2023. 新疆博格达晚石炭世构造—岩浆活动:来自基性侵入岩地球化学、年代学约束. 矿产勘查, 14(3): 335-347. [Cui Y B, Li X, Wang X L, Zhu G D. 2023. Late Carboniferous tectono-magmatic activity in Bogda Orogen: constraints from the rock geochemistry, geochronology of basic intrusive rocks. *Mineral Exploration*, 14(3): 335-347]
- 樊丹. 2023. 博格达地区石炭纪构造格架及其对盆地演化的控制. 中国地质大学(北京)硕士学位论文. [Fan D. 2023. Carboniferous tectonic framework and its control on the basin evolution in the Bogda area, NW China. Masteral dissertation of China University of Geosciences (Beijing)]
- 龚德瑜,齐雪峰,郑孟林,刘超威,秦志军,程斌,苗一豪,韩琰,吴卫安,王瑞菊. 2024. 准噶尔盆地克拉美丽气田及周缘天然气成因来源再认识与勘探启示. 天然气工业, 44(2): 81-91. [Gong D Y, Qi X F, Zheng M L, Liu C W, Qin Z J, Cheng B, Miao Y H, Han Y, Wu W A, Wang R J. 2024. Origin of natural gas in the Kelameili Gas Field in the Junggar Basin and its periphery: re-understanding and its implications for natural gas exploration. *Natural Gas Industry*, 44(2): 81-91]
- 勾永东,张伟,舒石,陆强,葛宁宁. 2023. 博格达造山带中段木孜德克杂岩体地球化学、年代学特征及地质意义. 四川地质学报, 43(3): 520-527, 543. [Gou Y D, Zhang W, Shu S, Lu Q, Ge N N. 2023. Geochemistry, chronology and geological significance of Muzdek complex pluton in the middle of the Bogda orogenic belt. *Acta Geologica Sichuan*, 43(3): 520-527, 543]
- 何登发,陈新发,况军,袁航,樊春,唐勇,吴晓智. 2010a. 准噶尔盆地石炭系烃源岩分布与含油气系统. 石油勘探与开发, 37(4): 397-408. [He D F, Chen X F, Kuang J, Yuan H, Fan C, Tang Y, Wu X Z. 2010a. Distribution of Carboniferous source rocks and petroleum systems in the Junggar Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 37(4): 397-408]
- 何登发,陈新发,况军,袁航,吴晓智,杜鹏,唐勇. 2010b. 准噶尔盆地石炭系油气成藏组合特征及勘探前景. 石油学报, 31(1): 1-11. [He D F, Chen X F, Kuang J, Yuan H, Wu X Z, Du P, Tang Y. 2010b. Characteristics and exploration potential of Carboniferous hydrocarbon plays in Junggar Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 1-11]

- 焦小芹,张关龙,牛花朋,王圣柱,于洪洲,熊峥嵘,周健,谷文龙. 2022. 准噶尔盆地东北缘石炭系火山岩形成机制: 对准噶尔洋盆闭合时限的新启示. 地学前缘, 29(4): 385-402. [Jiao X Q, Zhang G L, Niu H P, Wang S Z, Yu H Z, Xiong Z R, Zhou J, Gu W L. 2022. Genesis of Carboniferous volcanic rocks in northeastern Junggar Basin: new insights into the Junggar Ocean closure. *Earth Science Frontiers*, 29(4): 385-402]
- 李涤. 2011. 准噶尔盆地石炭系火山岩岩石地球化学特征及构造环境. 中国地质大学(北京)硕士学位论文. [Li D. 2011. Geochemical characteristics and tectonic settings of Carboniferous volcanic rocks from Junggar Basin, China. Masteral dissertation of China University of Geosciences(Beijing)]
- 李涤. 2016. 准噶尔盆地及邻区石炭纪构造格架与沉积充填演化. 中国地质大学(北京)博士学位论文. [Li D. 2016. Carboniferous tectonic framework and sedimentary filling evolution in the Junggar Basin and adjacent area, NW China. Doctoral dissertation of China University of Geosciences(Beijing)]
- 李向民,夏林圻,夏祖春,徐学义,马中平,王立社. 2004. 东天山企鹅山群火山岩锆石 U-Pb 年代学. 地质通报, 23(12): 1215-1220. [Li X M, Xia L Q, Xia Z C, Xu X Y, Ma Z P, Wang L S. 2004. Zircon U-Pb geochronology of volcanic rocks of the Qieshan Group in the East Tianshan Mountains. *Regional Geology of China*, 23(12): 1215-1220]
- 刘俊田,翟亚梅,苟红光,任红,马强. 2012. 吐哈盆地托克逊凹陷油气成藏地质条件及勘探潜力. 新疆石油天然气, 8(3): 1-7. [Liu J T, Zhai Y M, Gou H G, Ren H, Ma Q. 2012. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential in Toksum Depression of Turpan-Hami Basin. *Xinjiang Oil & Gas*, 8(3): 1-7]
- 罗婷,廖群安,陈继平,张雄华,郭东宝,胡兆初. 2012. 东天山雅满苏组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义. 地球科学, 37(6): 1338-1352. [Luo T, Liao Q A, Chen J P, Zhang X H, Guo D B, Hu Z C. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the volcanic rocks from Yamansu Formation in the eastern Tianshan, and its geological significance. *Earth Science*, 37(6): 1338-1352]
- 宋倩倩,冯江鹏,潘占超,孙秀凤. 2020. 新疆博格达地区晚石炭世柳树沟组玄武岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及时代讨论. 新疆有色金属, 43(4): 90-91. [Song Q Q, Feng J P, Pan Z C, Sun X F. 2020. Zircon SHRIMP U-Pb dating of basalt from Liushugou Formation in Bogda area, Xinjiang and its age discussion. *Xinjiang Youse Jinshu*, 43(4): 90-91]
- 孙国智. 2009. 新疆博格达地区石炭纪原型盆地分析. 西北大学硕士学位论文. [Sun G Z. 2009. The Carboniferous prototype basin analysis in Bogda region, Xinjiang, north-west China. Masteral dissertation of Northwest University]
- 孙天鸽. 2022. 吐哈盆地石炭—二叠系构造—地层层序与沉积充填演化. 中国地质大学(北京)硕士学位论文. [Sun T G. 2022. Tectonic-stratigraphic sequences and sedimentary filling of Carboniferous to Permian in Turpan-Hami Basin. Masteral dissertation of the University of Geosciences(Beijing)]
- 谭佳奕,吴润江,张元元,王淑芳,郭召杰. 2009. 东准噶尔卡拉麦里地区巴塔玛依内山组火山岩特征和年代确定. 岩石学报, 25(3): 539-546. [Tan J Y, Wu R J, Zhang Y Y, Wang S F, Guo Z J. 2009. Characteristics and geochronology of volcanic rocks of Bata-mayineishan Formation in Kalamaili, eastern Junggar, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 25(3): 539-546]
- 陶晓杨. 2019. 新疆东、西准噶尔下泥盆统典型剖面对比研究. 长安大学硕士学位论文. [Tao X Y. 2019. The comparative study of standard stratotype-section in Lower Devonian at east and west of Junggar, Xinjiang. Masteral dissertation of Changan University]
- 田健,廖群安,樊光明,聂小妹,王富明. 2015. 东准噶尔卡拉麦里断裂以南早石炭世后碰撞花岗岩的发现及其地质意义. 岩石学报, 31(5): 1471-1484. [Tian J, Liao Q A, Fan G M, Nie X M, Wang F M. 2015. The discovery and tectonic implication of Early Carboniferous post-collisional I-type granites from the south of Karamaili in eastern Junngar. *Acta Petrologica Sinica*, 31(5): 1471-1484]
- 田少兵,蔡建超,胡祥云,李建慧,曾思红,徐珊. 2014. 准噶尔中东部地区深部电性结构电磁探测. 地球科学, 39(5): 620-628. [Tian S B, Cai J C, Hu X Y, Li J H, Zeng S H, Xu S. 2014. Deep conductivity structure in middle-east Junggar Basin using MT. *Earth Science*, 39(5): 620-628]
- 汪晓伟,崔方磊,孙吉明,朱小辉,白建科,朱涛. 2015. 博格达造山带东段芨芨台子地区早二叠世双峰式火山岩地球化学特征及其地质意义. 西北地质, 48(4): 100-114. [Wang X W, Cui F L, Sun J M, Zhu X H, Bai J K, Zhu T. 2015. Geochemical characteristics and its significance of the Early Permian Bimodal volcanic rocks in Jijitai area, east of the Bogda Orogenic Belt. *Northwestern Geology*, 48(4): 100-114]
- 王圣柱,王千军,张关龙,白仲才,熊峥嵘,梅文科,赵乐强. 2020. 准噶尔盆地石炭系烃源岩发育模式及地球化学特征. 油气地质与采收率, 27(4): 13-25. [Wang S Z, Wang Q J, Zhang G L, Bai Z C, Xiong Z R, Mei W K, Zhao L Q. 2020. Development mode and geochemical characteristics of Carboniferous source rocks in Junggar Basin. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 27(4): 13-25]
- 王淑芳,邹才能,侯连华,卫延召,罗霞,郭召杰. 2013. 准噶尔盆地东部石炭系火山岩气藏石油地质特征及有利勘探方向分析. 地学前缘, 20(2): 226-236. [Wang S F, Zou C N, Hou L H, Wei Y Z, Luo X, Guo Z J. 2013. Petroleum geological characteristics of gas accumulation in Carboniferous volcanics and prospect for gas exploration, eastern Junggar Basin. *Earth Science Frontiers*, 20(2): 226-236]
- 王雯,夏芳,柴凤梅,吴生军,李强,耿新霞,孟庆鹏. 2016. 东天山石炭纪雅满苏组火山岩特征及地质意义. 岩石矿物学杂志, 35(5): 768-790. [Wang W, Xia F, Chai F M, Wu S J, Li Q, Geng X X, Meng Q P. 2016. Geochronology and geochemistry of volcanic rocks from the Yamansu Formation in eastern Tianshan Mountains and their tectonic implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35(5): 768-790]
- 王银喜,顾连兴,张遵忠,吴昌志,张开均,李惠民,杨杰东. 2006. 博格达裂谷双峰式火山岩地质年代学与 Nd-Sr-Pb 同位素地球化

- 学特征. 岩石学报, 22(5): 1215-1224. [Wang Y X, Gu L X, Zhang Z Z, Wu C Z, Zhang K J, Li H M, Yang J D. 2006. Geochronology and Nd-Sr-Pb isotops of the bimodal volcanic rocks of the Bogda rift. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1215-1224]
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 朱宝清, 李锦轶, 赵民. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京: 地质出版社. [Xiao X C, Tang Y Q, Feng Y M, Zhu B Q, Li J Y, Zhao M. 1992. *Tectonics of Northern Xinjiang and Its Adjacent Areas*. Beijing: Geological Publishing House]
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京: 地质出版社. [Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. 1993. *Regional geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region*. Beijing: Geological Publishing House]
- 杨帆, 宋永, 陈洪, 龚德瑜, 卞保力, 刘海磊. 2019. 准噶尔盆地阜东地区石炭系松喀尔苏组烃源岩评价及气源对比. 天然气地球科学, 30(7): 1018-1026. [Yang F, Song Y, Chen H, Gong D Y, Bian B L, Liu H L. 2019. Evaluation of Carboniferous Songkaersu Formation source rocks and gas-source correlation in the Fukang sag of eastern Junggar Basin. *Natural Gas Geoscience*, 30(7): 1018-1026]
- 杨浩, 李淦, 侯烁钦, 樊丹, 何登发. 2023. 准噶尔盆地东北缘石炭系年代-地层格架: 对卡拉麦里洋闭合时限的启示. 地质科学, 58(1): 105-123. [Yang H, Li D, Hou S Q, Fan D, He D F. 2023. Carboniferous chronostratigraphic framework in the northeastern margin of the Junggar Basin: implications for the closure time of Karaimali Ocean. *Chinese Journal of Geology*, 58(1): 105-123]
- 张磊. 2020. 准噶尔地区石炭纪盆地地质结构、充填及成因机制. 中国地质大学(北京)博士学位论文. [Zhang L. 2020. *Geological architecture, sedimentary filling, formation and mechanism of the Carboniferous basin in the Junggar area, NW China*. Doctoral dissertation of China University of Geosciences(Beijing)]
- 赵治信. 2009. 新疆北部石炭系划分. 新疆石油地质, 30(4): 478-482. [Zhao Z X. 2009. Classification of Carboniferous in northern Xinjiang. *Xinjiang Petroleum Geology*, 30(4): 478-482]
- 甄宇, 陈旋, 焦立新, 李新宁, 周志超, 刘文辉, 殷树铮, 李淦, 苟红光, 李成明, 何登发. 2024. 东疆地区石炭纪一二叠纪构造古地理与原型盆地演化. 古地理论, 26(1): 78-99. [Zhen Y, Chen X, Jiao L X, Li X N, Zhou Z C, Liu W H, Yin S Z, Li D, Gou H G, Li C M, He D F. 2024. Carboniferous-Permian tectonopaleogeography and prototype basin evolution in eastern Xinjiang, NW China. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 26(1): 78-99]
- 郑加行, 赵同阳, 韩琼, 李平, 唐智, 孙耀锋, 刘鑫, 李航, 常臻. 2017. 东天山阿奇山组火山岩锆石 U-Pb 年龄地球化学特征及意义. 新疆地质, 35(4): 446-454. [Zheng J X, Zhao T Y, Han Q, Li P, Tang Z, Sun Y F, Liu X, Li H, Chang C. 2017. Volcanic zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of aqishan formation in eastern Tianshan Mountain and its significance. *Xinjiang Geology*, 35(4): 446-454]
- 支东明, 李建忠, 陈旋, 杨帆, 刘俊田, 苟红光, 张华, 林霖, 李斌, 孙玉峰, 胡军. 2023. 吐哈盆地油气勘探新领域、新类型及资源潜力. 石油学报, 44(12): 2122-2140. [Zhi D M, Li J Z, Chen X, Yang F, Liu J T, Gou H G, Zhang H, Lin L, Li B, Sun Y F, Hu J. 2023. New fields, new types and resource potentials of oil-gas exploration in Tuha Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 44(12): 2122-2140]
- 邹国庆, 余牛奔, 孙国庆, 黄修保, 尼加提·阿布都逊, 卢观送. 2021. 东准噶尔奥依托浪格地区石炭纪双峰式火山岩地球化学特征及其构造意义. 吉林大学学报(地球科学版), 51(2): 455-472. [Zou G Q, Yu N B, Sun G Q, Huang X B, Abuduxun N, Lu G S. 2021. Geochemical characteristics and tectonic significance of Carboniferous bimodal volcanic rocks in Aoyituolangge area, eastern Junggar. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 51(2): 455-472]
- Bazhenov M L, Collins A Q, Degtyarev K E, Levashova N M, Mikolaichuk A V, Pavlov V E, Van der Voo R. 2003. Paleozoic northward drift of the North Tien Shan (Central Asia) as revealed by Ordovician and Carboniferous paleomagnetism. *Tectonophysics*, 366: 113-141.
- Carroll A R, Graham S A, Hendrix M S, Ying D, Zhou D. 1995. Late Paleozoic tectonic amalgamation of northwestern China: sedimentary record of the northern Tarim, northwestern Turpan, and southern Junggar Basins. *GSA Bulletin*, 107: 571-594.
- Chen X J, Shu L S, Santosh M, Xu Z Q. 2014. The provenance and tectonic affinity of the Paleozoic meta-sedimentary rocks in the Chinese Tianshan belt: new insights from detrital zircon U-Pb geochronology and Hf-isotope analysis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 94: 12-27.
- Choulet F, Chen Y, Wang B, Faure M, Cluzel D, Charvet J, Lin W, Xu B. 2011. Late Paleozoic paleogeographic reconstruction of western Central Asia based upon paleomagnetic data and its geodynamic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42: 867-884.
- Coleman R G. 1989. Continental growth of northwest China. *Tectonics*, 8: 621-635.
- Han Y G, Zhao G C. 2018. Final amalgamation of the Tianshan and Junggar orogenic collage in the southwestern Central Asian Orogenic Belt: Constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean. *Earth-Science Reviews*, 186: 129-152.
- Huang B, Fu D, Kusky T, Ruan K P, Zhou W X, Zhang X H. 2018. Sedimentary provenance in response to Carboniferous arc-basin evolution of East Junggar and North Tianshan belts in the southwestern Central Asian Orogenic Belt. *Tectonophysics*, 722: 324-341.
- Jahn B M, Wu F Y, Chen B. 2000. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 23: 82-92.
- Jiang S H, Li S Z, Somerville I D, Lei J P, Yang H Y. 2015. Carboniferous-Permian tectonic evolution and sedimentation of the Turpan-Hami Basin, NW China: implications for the closure of the Paleo-Asian Ocean. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 644-655.
- Kröner A, Kovach V, Belousova E, Hegner E, Armstrong R, Dolgoplova A, Seltmann R, Alexeiev D V, Hoffmann J E, Wong J, Sun M, Cai K, Wang T, Tong Y, Wilde S A, Degtyarev K E, Rytsk E. 2014. Reassessment of continental growth during the accretionary history of the

- Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 25: 103–125.
- Li D, He D F, Santosh M, Ma D L, Tang J Y. 2015. Tectonic framework of the northern Junggar Basin part I: the eastern Luliang Uplift and its link with the East Junggar terrane. *Gondwana Research*, 27: 1089–1109.
- Li D, He D F, Sun M, Zhang L. 2020. The role of arc-arc collision in accretionary orogenesis: insights from ~ 320 Ma tectono-sedimentary transition in the Karamaili area, NW China. *Tectonics*, 39: e2019TC005623.
- Li D, He D F, Lu Y, Fan D, Zhen Y, Hou S Q. 2021. Diverse origins of Late Paleozoic calc-alkaline magmatic rocks from the Bogda tectonic belt: implications for the geodynamic evolution of the eastern Tianshan, NW China. *Lithos*, 404: 106442.
- Li L, Xiao W J, Windley B F, Yang H, Jia X L, Sang M, Abuduxun N, Liu Y. 2022. Early Carboniferous rifting of the Harlik arc in the eastern Tianshan (NW China): response to rollback in the southern Altaids? *American Journal of Science*, 322: 313–350.
- Li X G, Chen G, Wu C, Li J, Haproff P J, Geng M, Wu S H, Xu S H, Li Z J, Yang D. 2023. Tectono-stratigraphic framework and evolution of east Junggar Basin, central Asia. *Tectonophysics*, 851: 229758.
- Liu W, Liu X J, Liu L J. 2013. Underplating generated A- and I-type granitoids of the East Junggar from the lower and the upper oceanic crust with mixing of mafic Magma: insights from integrated zircon U-Pb ages, petrography, geochemistry and Nd-Sr-Hf isotopes. *Lithos*, 179: 293–319.
- Mentimin M, Pe-Piper G, Piper D J W, Guo Z J, Zhang Y Y. 2020. Carboniferous arc-related volcanism in SW Bogda Mountain, Northwest China, and its implications for regional tectonics. *Lithos*, 360: 105413.
- Şengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364: 299–307.
- Su B X, Qin K Z, Sakyi P A, Li X H, Yang Y H, Sun H, Tang D M, Liu P P, Xiao Q H, Malaviarachchi S P K. 2011. U-Pb ages and Hf-O isotopes of zircons from Late Paleozoic mafic-ultramafic units in the southern Central Asian Orogenic Belt: tectonic implications and evidence for an Early-Permian mantle plume. *Gondwana Research*, 20(2–3): 516–531.
- Su Y P, Zheng J P, Griffin W L, Tang H Y, O'Reilly S Y, Lin X Y. 2010. Zircon U-Pb and Hf isotopes of volcanic rocks from the Batamayneishan Formation in the eastern Junggar Basin. *Chinese Science Bulletin*, 55(36): 4150–4161.
- Su Y P, Zheng J P, Griffin W L, Zhao J H, Tang H Y, Ma Q, Lin X Y. 2012. Geochemistry and geochronology of Carboniferous volcanic rocks in the eastern Junggar terrane, NW China: implication for a tectonic transition. *Gondwana Research*, 22: 1009–1029.
- Tang G J, Wang Q, Wyman D A, Dan W, Ma L, Zhang H X, Zhao Z H. 2020. Petrogenesis of the ulungur intrusive complex, NW China, and implications for crustal generation and reworking in accretionary orogens. *Journal of Petrology*, 61(2): ega018.
- Tang W B, Wang X J, Guo X G, He W J, Tang Y, Pe-Piper G, Piper D J W, Guo Z J, Cheng F, Li W, Zhang Y Y. 2022. Late Carboniferous back-arc rifting in Junggar Basin, NW China: implication for the rapid continental growth in accretionary orogens. *International Journal of Earth Sciences*, 111: 2493–2518.
- Tang W H, Zhang Z C, Li J F, Li K, Chen Y, Guo Z J. 2014. Late Paleozoic to Jurassic tectonic evolution of the Bogda area (Northwest China): evidence from detrital zircon U-Pb geochronology. *Tectonophysics*, 626: 144–156.
- Wali G, Wang B, Cluzel D, Zhong L L. 2018. Carboniferous-Early Permian magmatic evolution of the Bogda Range (Xinjiang, NW China): implications for the Late Paleozoic accretionary tectonics of the SW Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 153: 238–251.
- Wang J, Cao Y C, Wang X T, Liu K Y, Wang Z K, Xu Q S. 2018. Sedimentological constraints on the initial uplift of the West Bogda Mountains in Mid-Permian. *Scientific Reports*, 8: 1453.
- Wang J, Su Y P, Zheng J P, Belousova E A, Chen M, Dai H K, Zhou L. 2022. Rapid transition from oceanic subduction to postcollisional extension revealed by Carboniferous magmatism in East Junggar (NW China), southwestern Central Asian orogenic belt. *GSA Bulletin*, 134: 1018–1042.
- Wang Y X, Mooney W D, Yuan X C, Coleman R G. 2003. The crustal structure from the Altai Mountains to the Altyn Tagh fault, northwest China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108: 2001JB000552.
- Wilhem C, Windley B F, Stampfli G M. 2012. The Altaids of Central Asia: a tectonic and evolutionary innovative review. *Earth-Science Reviews*, 113(3–4): 303–341.
- Xiao W J, Han C M, Yuan C, Sun M, Lin S F, Chen H L, Li Z L, Li J L, Sun S. 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: implications for the tectonic evolution of central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2–4): 102–117.
- Xiao W J, Windley B F, Allen M B, Han C M. 2013. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan orogenic collage. *Gondwana Research*, 23(4): 1316–1341.
- Xiao W J, Windley B F, Sun S, Li J L, Huang B C, Han C M, Yuan C, Sun M, Chen H L. 2015. A tale of amalgamation of three permo-Triassic collage systems in central Asia: oroclinal sutures, and terminal accretion. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43: 477–507.
- Xiao Y, Zhang H F, Shi J A, Su B X, Sakyi P A, Lu X C, Hu Y, Zhang Z. 2011. Late Paleozoic magmatic record of East Junggar, NW China and its significance: implication from zircon U-Pb dating and Hf isotope. *Gondwana Research*, 20(2–3): 532–542.
- Xie W, Luo Z Y, Xu Y G, Chen Y B, Hong L B, Ma L, Ma Q. 2016a. Petrogenesis and geochemistry of the Late Carboniferous rear-arc (or back-arc) pillow basaltic lava in the Bogda Mountains, Chinese North Tianshan. *Lithos*, 244: 30–42.

- Xie W, Xu Y G, Luo Z Y, Liu H Q, Hong L B, Ma L. 2016b. Petrogenesis and geodynamic implications of the Late Carboniferous felsic volcanics in the Bogda belt, Chinese Northern Tianshan. *Gondwana Research*, 39: 165–179.
- Xie W, Xu Y G, Chen Y B, Luo Z Y, Hong L B, Ma L, Liu H Q. 2016c. High-alumina basalts from the Bogda Mountains suggest an arc setting for Chinese Northern Tianshan during the Late Carboniferous. *Lithos*, 256: 165–181.
- Yang G X, Li Y J, Wu H E, Zhong X, Yang B K, Yan C X, Yan J, Si G H. 2011. Geochronological and geochemical constrains on petrogenesis of the Huangyangshan A-type granite from the East Junggar, Xinjiang, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40: 722–736.
- Yang X F, He D F, Wang Q C, Tang Y. 2012. Tectonostratigraphic evolution of the Carboniferous arc-related basin in the East Junggar Basin, Northwest China: insights into its link with the subduction process. *Gondwana Research*, 22(3–4): 1030–1046.
- Zhang D H, Wang G C, Pullen A, Abell J T, Cheng F, Shen T Y, Ji J L, Zhang M. 2025. A westerly dominated Early Cretaceous eolian system in the Hami Basin, NW China. *Geological Society of America Bulletin*, 137: 137–155.
- Zhang X B, Chai F M, Chen C, Quan H Y, Gong X P. 2020. Geochronology, geochemistry and tectonic implications of Late Carboniferous Dahayan intrusions from the Bogda Mountains, eastern Tianshan. *Geological Magazine*, 157: 289–306.
- Zhang Y, Pe-Piper G, Piper D J W, Guo Z. 2013. Early Carboniferous collision of the Kalamaili orogenic belt, North Xinjiang, and its implications: evidence from molasse deposits. *GSA Bulletin*, 125: 932–944.
- Zhang Y Y, Sun M, Yuan C, Long X P, Jiang Y D, Li P F, Huang Z Y, Du L. 2018. Alternating trench advance and retreat: insights from Paleozoic magmatism in the eastern Tianshan, Central Asian Orogenic Belt. *Tectonics*, 37: 2142–2164.
- Zhao J M, Xiao W J, Chen X F, Wang X J, Song Y, Bian B L, Zhang X K, Strelchenko I P, Xu Q, Zhang H, Zheng Y C, Liu H B, Neupane B, Ma Z J. 2021. Mixed crystalline basement of Junggar Basin revealed by wide-angle seismic evidence. *Earth Sciences and Subsoil Use*, 44: 8–29.
- Zhao R, Zhang J Y, Zhou C M, Zhang Z J, Chen S, Stockli D F, Olariu C, Steel R, Wang H. 2020. Tectonic evolution of Tianshan-Bogda-Kelameili mountains, clastic wedge basin infill and chronostratigraphic divisions in the source-to-sink systems of Permian-Jurassic, southern Junggar Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 114: 104200.
- Zhen Y, He D F, Li D, Chen X, Fu G B. 2024. Episodic evolution of intracontinental orogenic deformation: insight from the southern Bogda fold-and-thrust belt of the Tianshan Mountains, NW China. *Tectonophysics*, 876: 230266.
- Zhou T F, Yuan F, Fan Y, Zhang D Y, Cooke D, Zhao G C. 2008. Granites in the Sawuer region of the west Junggar, Xinjiang Province, China: geochronological and geochemical characteristics and their geodynamic significance. *Lithos*, 106(3–4): 191–206.

(责任编辑 张西娟)