

博格达地区二叠纪原型盆地沉积充填与演化

殷树铮¹,何登发¹,付国斌²,郭文建³

[1. 中国地质大学(北京) 能源学院,北京 100083;2. 中国石油 吐哈油田公司 勘探开发研究院,新疆 哈密 839009;
3. 中国石油 新疆油田公司 勘探开发研究院,新疆 克拉玛依 834000]

摘要:博格达山分隔了准噶尔盆地和吐哈盆地,其盆-山关系和两侧盆地二叠纪的构造属性存在诸多争议。探究两侧盆地二叠系沉积充填特征及二叠纪构造-沉积演化过程,是厘定两侧盆地构造属性与探讨盆-山耦合关系的重要手段。基于准噶尔盆地和吐哈盆地的钻井、测井、岩心和露头资料,运用沉积充填分析和沉积相识别等手段,阐明了博格达山及南、北两侧的吐哈盆地和准噶尔盆地东部二叠纪的构造属性、沉积充填特征及其演化过程。结果表明:①早二叠世,研究区在区域伸展的构造背景下发育裂谷型沉积,冲积扇-辫状河-扇三角洲沉积体系发育。②中二叠世发育裂陷-坳陷型沉积,早期在区域伸展应力作用下,裂谷持续发育,博格达山南侧吐哈盆地内中二叠统发育双峰式火山岩;晚期伸展应力减弱,发育坳陷型的滨浅湖-半深湖沉积;末期,区域伸展应力转变为挤压应力,博格达裂谷开始发生回返。③晚二叠世,持续的区域挤压应力环境下,博格达裂谷发生大规模反转,并开始隆升,成为该地区的物源供给区,同时沉积基准面升高,研究区发育三角洲-滨浅湖的沉积体系,两侧盆地开始进入前陆坳陷的演化阶段。构造-沉积演化过程反映了博格达地区二叠纪主要受区域伸展应力影响,发育断陷-坳陷型盆地,而区域构造应力的转变和沉积基准面的变化,是该时期原型盆地充填样式和古地理格局的主要控制因素。

关键词:沉积充填;构造演化;二叠纪;博格达地区;准噶尔盆地;吐哈盆地

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Sedimentary filling and evolution of the Permian prototype basin in Bogda area, China

YIN Shuzheng¹, HE Dengfa¹, FU Guobin², GUO Wenjian³

[1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, Tuha Oilfield Company, PetroChina, Hami, Xinjiang 839009, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang 834000, China]

Abstract: The Bogda Mountains demarcate the Junggar Basin and the Turpan-Hami Basin, yet controversies persist regarding their basin-range relationship and the tectonic attributes of Permian strata on both flanks. Investigating the Permian sedimentary filling characteristics and tectono-sedimentary evolutionary processes in adjacent basins proves crucial for determining their tectonic attributes and elucidating basin-range coupling mechanisms. Building upon previous research and utilizing comprehensive datasets including borehole logs, well cores, and outcrop observations from both basins, this study employs sedimentary filling analysis and facies identification to clarify the Permian tectonic attributes, sedimentary filling patterns, and evolutionary trajectories of the Bogda Mountains and their adjacent basins. Key findings include that during the Early Permian, the study area experienced rift sedimentation under the regional extension, characterized by the formation of the sedimentary system consisting of alluvial fans, braided rivers, and fan deltas. During the Middle Permian, the study area underwent rift-sag sedimentation. In the early stage of the Middle Permian, rift sedimentation continued under regional extensional stress, accompanied by the formation of the Middle Permian bimodal volcanic rocks in the Turpan-Hami Basin. In the late stage of the Middle Permian, the sag-type deposition of littoral-shallow lacustrine and semi-deep lacustrine facies occurred as the extensional stress waned. While

收稿日期:2025-03-10;修回日期:2025-06-10。

第一作者简介:殷树铮(1990—),男,博士研究生,含油气盆地构造-沉积分析。E-mail: yinshuzheng@163.com。

通信作者简介:何登发(1967—),男,博士、教授,构造地质学与石油地质学,盆地构造与能源地质研究。E-mail: hedengfa282@263.net。

基金项目:国家自然科学基金重点项目(U19B6003-01-01)。

the end of the Middle Permian witnessed tectonic inversion with regional stress transitioning from extension to compression. During the Late Permian, continued regional extensional stress led to the large-scale rift inversion and initial uplift, transforming Bogda into a provenance area. Concurrent base-level rise facilitated the deltaic and littoral-shallow lacustrine deposition therein, marking the onset of foreland depression evolution in both basins. The tectono-sedimentary evolution indicates that the Permian basin development in Bogda area is principally driven by regional extension, with subsequent stress transformation and base-level changes serving as primary factors governing prototype basin architecture and paleogeographic configuration.

Key words: sedimentary filling, tectonic evolution, Permian, Bogda area, Junggar Basin, Turpan-Hami Basin

引用格式: 殷树铮, 何登发, 付国斌, 等. 博格达地区二叠纪原型盆地沉积充填与演化[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(1): 124-142. DOI: 10. 11743/ogg20260109.

YIN Shuzheng, HE Dengfa, FU Guobin, et al. Sedimentary filling and evolution of the Permian prototype basin in Bogda area, China[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(1): 124-142. DOI: 10. 11743/ogg20260109.

准噶尔盆地和吐哈盆地是中国西北地区重要的含油气盆地, 勘探实践表明, 二叠系是两个盆地重要的烃源岩发育和油气储集层系^[1], 且二叠纪是整个北疆地区重要的板块拼合阶段和海-陆转化时期^[2], 期间剧烈的构造-岩浆活动导致博格达山及两侧盆地沉降和沉积过程复杂。博格达山作为东天山重要的分支, 是东疆地区重要的区域构造动力学边界和两侧盆地的物源供给区^[3-4]。因此, 博格达山的构造演化过程与吐哈盆地和准噶尔盆地东部(准东地区)的构造-沉积演化密切相关。但由于该地区晚古生代以来剧烈的构造运动, 导致其地质结构复杂, 地层遭受大范围剥蚀, 为该地区的研究工作带来了不小的困难, 如关于石炭纪—二叠纪博格达地区的构造环境存在有限洋盆、裂陷槽、裂谷和岛弧的争论^[5-10]。再者博格达山何时隆起也存在争议, 基于磷灰石裂变径迹、锆石 U-Pb 同位素测年和地层接触关系分析等手段, 前人认为的博格达山初始隆升时间为: ① 中-晚二叠世^[11-13]; ② 中-晚三叠世^[14, 15]; ③ 中-晚侏罗世—早白垩世^[16-19]。该地区构造活动复杂, 博格达山存在多期隆升, 裂变径迹可能指示了山体的快速隆升而非初始隆升, 且冷却年龄可能滞后于实际隆升时间, 同时地层接触关系也可能受后期构造运动的影响。博格达山隆升时间的争议使两侧二叠纪盆地的属性难以定性, 有伸展裂陷或断陷-断拗盆地^[20-22]和前陆盆地的观点^[23-25], 且由于二叠纪之后剧烈的构造运动, 博格达山强烈隆升并在南、北两侧形成了复杂的冲断带, 进一步加大了该地区二叠系研究的难度。但与之紧邻的准东地区和吐哈盆地却较好的保存了博格达山演化的地质记录。前人的研究主要利用博格达山南、北两侧的地质露头来揭示该地区二叠纪的充填演化过程, 也因此积累了丰富的露头资料^[23-30], 主要包括乌鲁木齐和大龙口地区的露头等, 但

对于盆地内钻井序列与露头相结合的研究较少。盆地的沉积充填序列是反映相邻造山带演化的最连续、最敏感的地质记录^[31], 强烈的造山运动通常会引起地层记录的急剧变化或者不连续。因此, 基于博格达山两侧露头和盆地内大量的钻井所揭示的沉积充填特征的研究, 可以对博格达山的隆升进行约束, 进而探讨二叠纪吐哈盆地和准东地区的属性及二者与博格达山的盆-山构造演化过程。

1 区域地质背景

1.1 地质背景

博格达山及南、北两侧的吐哈盆地和准东地区位于中亚造山带南部, 其北部为西伯利亚克拉通, 南部为华北克拉通和塔里木克拉通(图 1a)。中亚造山带是显生宙以来全球最大的增生型造山带, 其地质历史漫长且复杂, 包括古亚洲洋俯冲以及相关增生楔、微陆块和岛弧的拼合与碰撞^[32-36], 形成该构造域内复杂的构造背景。二叠纪是中亚造山带从晚古生代的大陆拼合到中-新生代陆内盆-山体系演化的关键转折^[4, 37], 也是沉积环境由海相转变为陆相的重要时期。准东地区位于博格达山以北, 盆地内沉积了巨厚的二叠系—第四系, 地表被第四系覆盖(图 1c)。研究区结构复杂, 断裂极为发育, 隆-拗相间分布, 具有“棋盘式”的构造特征^[38], 盆地拗陷分布在南、北两侧, 中部被一近北西-南东向的隆起(沙奇凸起)相分隔(图 1b), 北侧的大井拗陷为克拉美丽山前拗陷, 南侧为博格达山前拗陷。

博格达山是东天山的重要分支, 近东西向呈弧形展布, 延伸超过 400 km, 分隔准东地区和吐哈盆地(图 1b)。大地构造位置上, 博格达山位于北天山晚古

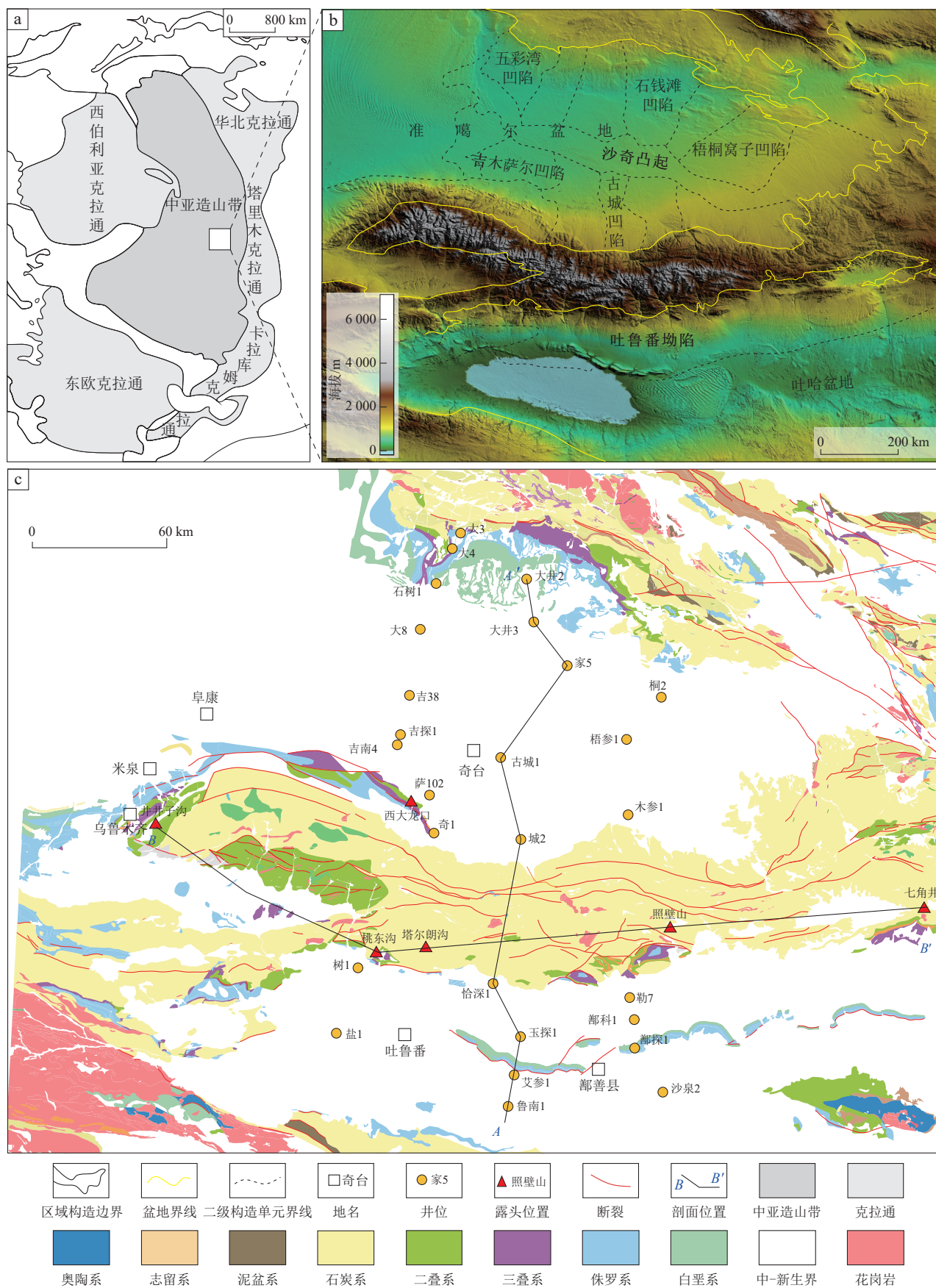


图1 博格达山构造位置(a, 修改自文献[39])、地理位置(b)和地质简图(c)

Fig. 1 Tectonic location map (a, modified after reference [39]), geographical location map (b), and geologic sketch map (c) of the Bogda Mountains

生代造山带中部,主体由石炭系海相火山岩-沉积岩系组成,出露最古老的地层为泥盆系,山体内部的断裂及南、北两侧的山前逆冲-褶皱系统共同记录了博格达山晚古生代以来的构造演化历史。二叠系主要出露在山体南、北两麓,且以博格达山西段分布最为广泛(图 1c)。吐哈盆地位于博格达山以南(图 1b),盆地内沉积了厚层的二叠系-第四系,盆地北缘出露二叠系,盆地内部大部分地区被第四系覆盖,沉降幅度北深、南浅,地层北陡、南缓。

1.2 二叠系

博格达山及周缘二叠系以陆相碎屑沉积为主,由于平面上岩相变化迅速,且受同期发育的大规模造山作用的影响,造成二叠系岩石地层复杂,因此博格达山两侧盆地的地层划分方案不尽相同,依据博格达山周缘照壁山、塔尔朗沟、乌鲁木齐井井子沟和西大龙口剖面以及准噶尔盆地内钻井资料分别建立了吐哈盆地、准噶尔盆地东部与南缘完整地层沉积序列(图 2)。

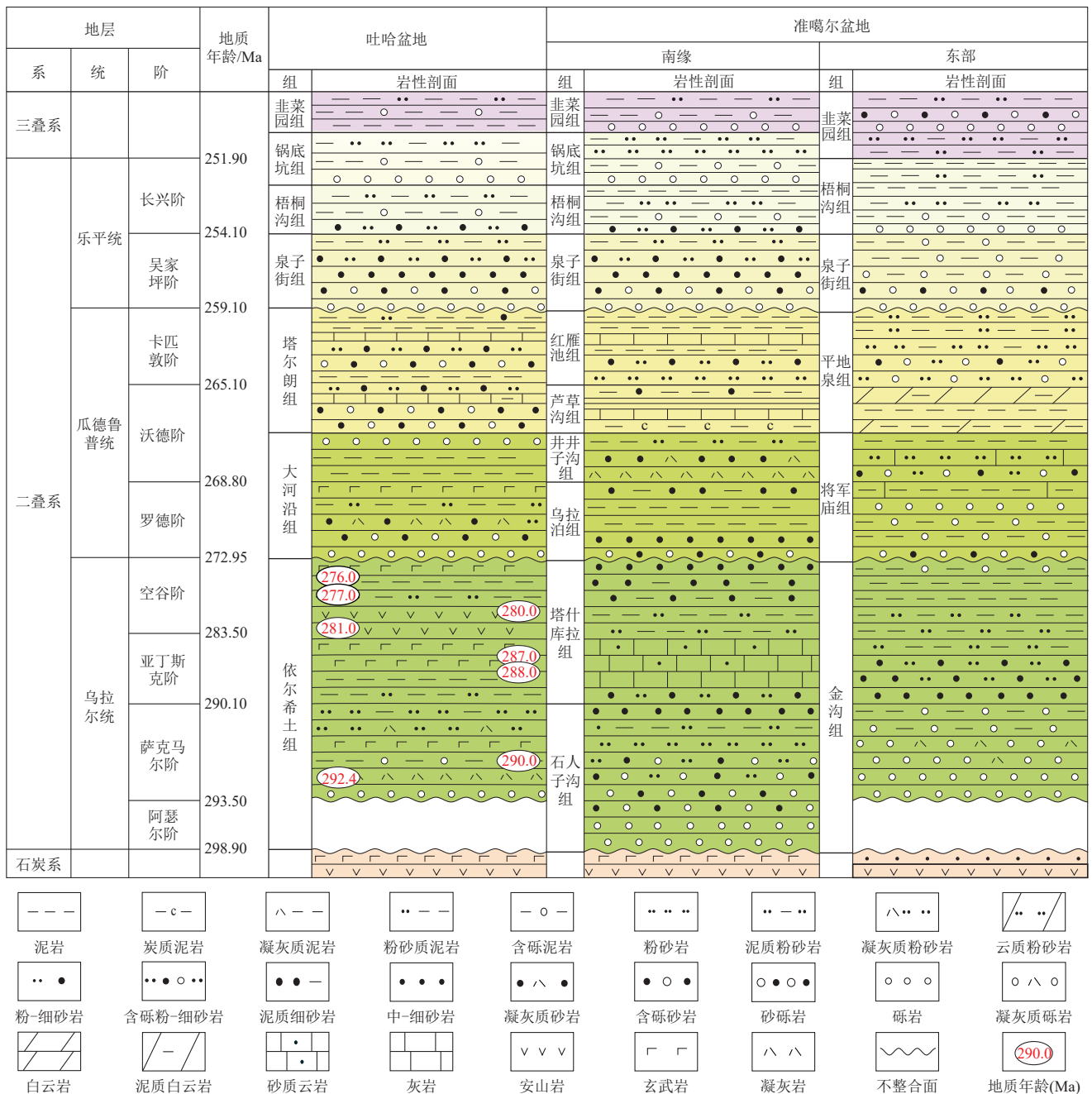


图 2 博格达山及其两侧盆地地层综合柱状图

Fig. 2 Composite stratigraphic column of the Bogda Mountains and two adjacent basins on both sides

(图中地质年龄数据引自文献[40]及吐哈油田内部报告。)

博格达山北侧的准噶尔盆地南部地区(淮南地区)自下而上发育:下二叠统的石人子沟组(P_{1s})和塔什库拉组(P_{1t});中二叠统的乌拉泊组(P_{2w})、井井子沟组(P_{2jj})、芦苇沟组(P_{2l})和红雁池组(P_{2h});上二叠统泉子街组(P_{3q})、梧桐沟组(P_{3wt})和锅底坑组(P_{3g})。准东地区下二叠统发育金沟组(P_{1jg}),中二叠统发育将军庙组(P_{2j})和平地泉组(P_{2p})。博格达山南侧自下而上发育:下二叠统依尔希土组(P_{1y}),中二叠统大河沿组(P_{2d})和塔尔朗组(P_{2t}),上二叠统地层划分与淮南地区一致(图2)。其中,准东地区内通常无法划分出锅底坑组,而将其归为梧桐沟组(P_{3wt})。

整体上,下二叠统在不同区域岩相特征差异较大,在柴窝堡盆地和吐哈盆地南部为海-陆过渡-海相碎屑沉积^[30, 38, 41-42],准东地区为陆相的粗碎屑沉积,在博格达山南侧一吐哈盆地北部的广大地区则发育陆相火山岩建造。中-上二叠统在研究区全部转变为陆相的碎屑沉积;中二叠统以半深湖-深湖亚相的细粒碎屑沉积为典型特征,该时期发育的灰黑色和黑色泥页岩为东疆地区一套重要的烃源岩;上二叠统则以陆相的粗碎屑为特征。博格达地区二叠系发育3套区域

性不整合面,分别是石炭系顶界与二叠系底界接触面(P/C)(图3a,b)、下二叠统与中二叠统接触面(P_2/P_1)和中二叠统与上二叠统接触面(P_3/P_2)(图3c,d)。区域性的不整合通常与大规模的区域性构造运动相关,因此可将研究区二叠纪的盆地演化划分为3个演化阶段,分别是早二叠世、中二叠世和晚二叠世。

2 周缘构造环境

2.1 石炭纪—二叠纪火山岩形成的构造背景

博格达周缘广泛发育石炭纪—二叠纪火山岩,前人对这些火山岩进行了详细的元素地球化学和年代学分析,其岩石地球化学特征揭示石炭纪和早二叠世的火山岩主要为玄武岩和流纹岩组成的双峰式火山岩,形成于板内裂谷环境。但博格达山南缘及吐哈盆地的部分早二叠世火山岩显示出与消减作用相关的地球化学信息,同时吐哈盆地北部石炭纪火山岩及基性岩墙的铂族元素分配特征排除了其岛弧或弧后盆地的可能^[43],微量元素和一些关键元素的特征显示岩浆上升



图3 博格达山南缘二叠系不整合面野外露头照片

Fig. 3 Photos showing the Permian unconformities on outcrops along the southern margin of the Bogda Mountains

a. 依尔希土组与石炭系柳树沟组不整合接触,柳树沟组为火山岩,依尔希土组底部为陆相碎屑岩($N 43^{\circ}13'22.99''$, $E 90^{\circ}25'25.09''$); b. 桃东沟地区大河沿组与柳树沟组之间缺失下二叠统,上石炭统逆冲于中二叠统大河沿组之上($N 43^{\circ}16'28.30''$, $E 88^{\circ}58'20.66''$); c. 照壁山剖面塔尔朗组与上覆泉子街组的角度不整合接触($N 43^{\circ}14'47.23''$, $E 90^{\circ}26'6.93''$); d. 桃东沟剖面塔尔朗组顶部与上覆泉子街组之间发育风化壳,代表了二者之间的不整合($N 43^{\circ}16'41.87''$, $E 89^{\circ}2'23.10''$)

过程中受陆壳混染,表明其可能形成于陆内拉张带或初始裂谷环境^[44-45]。此外,博格达地区晚石炭世末期—早二叠世早期的中-基性侵入岩的岩石地球化学特征显示其来源于亏损的岩石圈地幔,且受地壳物质混染,具有与俯冲带相关的火山岩相似的地球化学特征,其原因可能是在岩石圈地幔部分熔融之前已被交代,从而显示出“弧火山岩”特征,与吐哈盆地早二叠世火山岩的形成过程类似^[46, 47]。

2.2 博格达地区石炭纪—早二叠世构造演化格架

博格达地区所处的构造位置决定了其构造演化过程与古亚洲洋的演化密切相关,结合东疆地区蛇绿岩和岩浆演化特点,认为其构造演化过程为:寒武纪—中

奥陶世为整个北疆地区的洋盆扩张阶段,克拉美丽洋和北天山洋等古洋盆相继形成;晚奥陶世—晚泥盆世,发生了洋盆的俯冲,岛弧与地体拼贴,海水逐渐向东退去;石炭纪—早二叠世,又发生了洋盆的重新裂解与闭合^[48, 49],到晚石炭世周缘洋盆已全部闭合,天山构造带主体进入后碰撞伸展的板内调整阶段^[2, 50],并被早二叠世以来的后碰撞岩浆所覆盖。

晚石炭世—早二叠世的火山岩和侵入岩产生于后碰撞伸展的裂谷环境,在博格达山北麓的照壁山剖面观察到了同沉积断裂和下二叠统双峰式火山岩(图4e—g),准噶尔盆地的深反射地震剖面也识别出了下二叠统同沉积断裂^[51]。此外,博格达山南部的祁家沟、天池和白杨河等地区均发育下二叠统水下塌堆

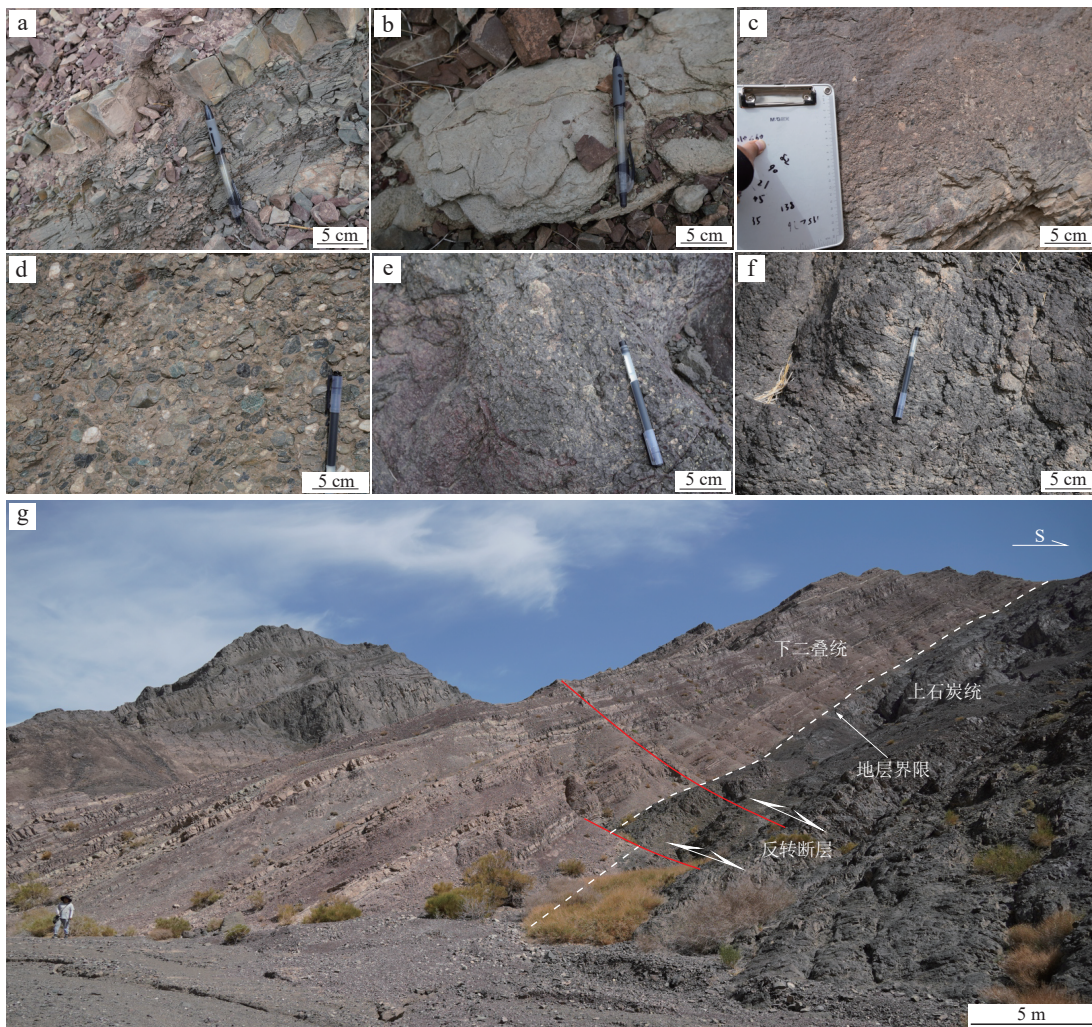


图4 博格达山南缘照壁山剖面下二叠统野外露头照片

Fig. 4 Photos showing the Lower Permian outcrops on the Zhaobi Mountain section along the southern margin of the Bogda Mountains

a. 依尔希土组下部的凝灰质泥岩和鲕粒灰岩层(N 43°13'22.99", E 90°25'25.09"); b. 灰白色鲕粒灰岩, 见生物碎屑(N 43°13'22.99", E 90°25'25.09"); c. 中部砾岩层, 砾石分选差, 磨圆中等, 砾石成分单一, 主要为安山质, 上覆黑色玄武岩(N 43°14'7.51", E 90°25'30.53"); d. 杂色砾岩, 砾石长轴具定向性, 优势方位约5°或185°(N 43°14'12.87", E 90°25'31.08"); e. 玄武岩, 具杏仁构造(N 43°14'12.87", E 90°25'31.08"); f. 玄武岩, 具气孔构造(N 43°14'12.87", E 90°25'31.08"); g. 剖面同沉积断裂(N 43°13'22.99", E 90°25'25.09"—N 43°14'12.87", E 90°25'31.08")

早二叠世,博格达地区处于后碰撞的陆内伸展阶段,由于石炭纪北天山洋盆的闭合和海水的退出,北疆地区进入了海-陆相转换的时期。准噶尔盆地主体已进入陆相的沉积环境,淮南地区则发育海相或海-陆过渡相(图4,图5)。乌鲁木齐井子沟地区下二叠统发育浅海相的复理石建造,准东地区和吐哈盆地北部则以陆相的冲积扇-辫状河-湖泊相为主,南部为滨浅海相(图5,图6),且在吐哈盆地内大规模发育火山岩。在博格达山南缘的照壁山剖面对下二叠统依尔希土组进行了详细观测,发现其底部的灰绿色凝灰质泥岩(厚度约40 cm)之上发育2层鲕粒灰岩,单层厚度约10 cm。整体上,剖面底部以大套红色的泥岩或泥质粉砂岩夹灰绿色凝灰岩为主(图4a,b),见厚层砾岩,砾石分选差,磨圆中等-差;中部发育玄武岩;顶部以泥页岩夹泥质灰岩为主(图4c,d),据此推测该时期照壁山地区早二叠世主体为滨浅湖-半深湖亚相(图5)。

3.2 中二叠统沉积充填特征

中二叠统在博格达山两侧的盆地内具有厚度大、连续且稳定分布的特征。准东地区中二叠统地层序列发育较为完整,分布范围广,在沙奇凸起两侧的博格达山前拗陷和克拉美丽山前拗陷内均有分布,且分别在远离凸起的方向加厚(即向现今山体的方向加厚)(图6)。博格达山南缘及吐哈盆地内中二叠统下部发育大河沿组,上部发育塔尔朗组,二者主要分布在博格达山南缘的吐鲁番拗陷内部,靠近北侧博格达山前厚度大,向南减薄(图6,图7)。

中二叠世博格达地区以滨浅湖-半深湖亚相为主,在湖盆边缘发育河流-冲积扇-三角洲沉积体系(图6,图7)。以博格达山南缘的中二叠统露头剖面为例,下部大河沿组发育典型的冲积扇沉积体系,其岩性以厚层的杂色砾岩为主,杂基呈红色,砾石具定向性(图8a,b),偶见近直立砾石,分选差,磨圆中等-差,底部砾石呈尖棱状,向上砂质增多,上部为砂砾岩,顶部过渡为含砾砂岩,中部发育玄武岩(图8c),局部发育交错层理。大河沿组露头区的岩石特征显示其沉积区距离物源区近,砾石未经长距离搬运,交错层理的发育可能由辫状河道的侧向迁移形成,单向水流造成了砾石的定向排列,因此推测大河沿组的沉积环境为辫状河-冲积扇。大河沿组中部发育的玄武岩指示了伸展背景下的火山活动,沉积岩与火山岩的特征共同表明了中二叠世早期伸展背景下快速的沉降与粗碎屑堆积的特征。

中二叠统上部的塔尔朗组主要发育半深湖-深湖亚相,其岩性特征为:下部以灰绿色和黑色泥岩为主(图8d),中部为黑色砂岩夹泥岩(野外风化面呈红色),上部见厚层灰岩,石香肠构造发育(图8e),顶面见富油结核,发育生物化石,层内发育剪切褶皱(图8f)。纹层状的泥页岩显示该套沉积物以深水悬浮物质的垂向加积为主,位于波基面以下静水区,水动力弱,向上灰岩增多,表明水体在逐渐变浅。石香肠构造的发育指示了该时期的伸展环境,而剪切褶皱则为后期构造应力所产生。同时期博格达山北缘地区的西大龙口,发育半深湖-深湖亚相的芦苇沟组黑色页岩夹薄层灰白色白云岩,野外露头的页岩风化强烈,呈细小的片状或粉末状。可见该时期博格达山南、北两侧的沉积环境均为半深湖-深湖亚相。

3.3 上二叠统沉积充填特征

上二叠统分布范围与中二叠统基本一致,但厚度较中二叠统小,厚度变化趋势仍保持了向博格达山体加厚的特征,柴窝堡凹陷内厚度最大达1 300 m以上,准东地区及吐哈盆地内部上二叠统厚度则普遍在500 m以下(图9)。

博格达地区上二叠统主要发育梧桐沟组,沉积相以辫状河-三角洲-滨浅湖沉积体系为主(图6,图9,图10)。下部泉子街组发育辫状河道砾岩;梧桐沟组则主要由厚层的浅灰色砂砾岩和砂岩构成(图11d),向上砾岩减少,砂质增多;锅底坑组则以红色的泥岩为主,夹薄层的粉砂岩(图11f),垂向上构成呈正粒序的特征,同时构造活动强度也在减弱。

以博格达山南缘上二叠统露头剖面为例,上二叠统发育辫状河道沉积,以砾石和砂质沉积为特征,局部夹粉砂和黏土,垂向上形成“砂多、泥少”的宏观特征,下部常见由河道沙坝迁移形成的块状、水平层理(通常不明显)、大型板状交错层理和槽状交错层理。照壁山和桃东沟的泉子街组露头剖面显示,其底部为砾岩和含砾粗砂岩,向上砾石减少,过渡为中-粗砂岩夹砾岩,砂岩中发育低角度斜层理、槽状交错层理和包卷层理(图11a,e),部分露头显示砾石具定向性,方向为约为89°或269°,近东西向,磨圆中等,分选中等-差(图11b,c),垂向沉积特征具有明显的“二元结构”,为辫状河沉积。博格达山北缘的西大龙口地区上二叠统发育辫状河三角洲,以辫状河的河流沉积和缺少大量的泥石流沉积区别于扇三角洲^[56],而柴窝堡盆地则发育扇三角洲沉积,具有近源、粗粒和低成熟度的沉积特征,以进积型向上变细的序列为特征,扇三角洲平原、前缘和前

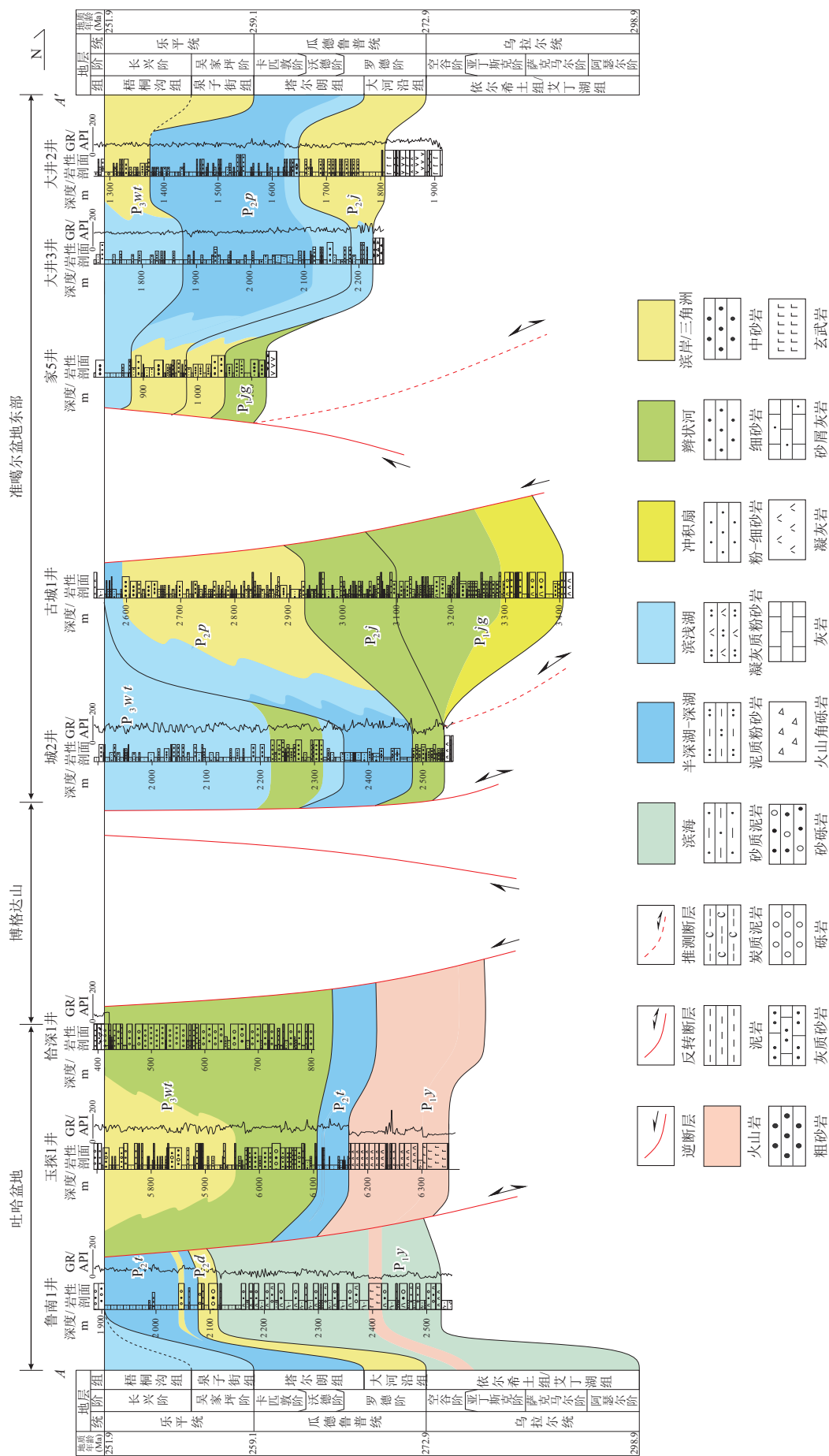


图6 博格达山及其周围二叠系南北向沉积相连续井剖面(剖面位置见图1c)

Fig. 6 N-S-oriented well-tied section showing the Permian sedimentary facies of the Bogda Mountains and its adjacent areas (see Fig. 1c for the section location)

(图中断裂为示意性的边界断裂或盆地内的主要断裂。)

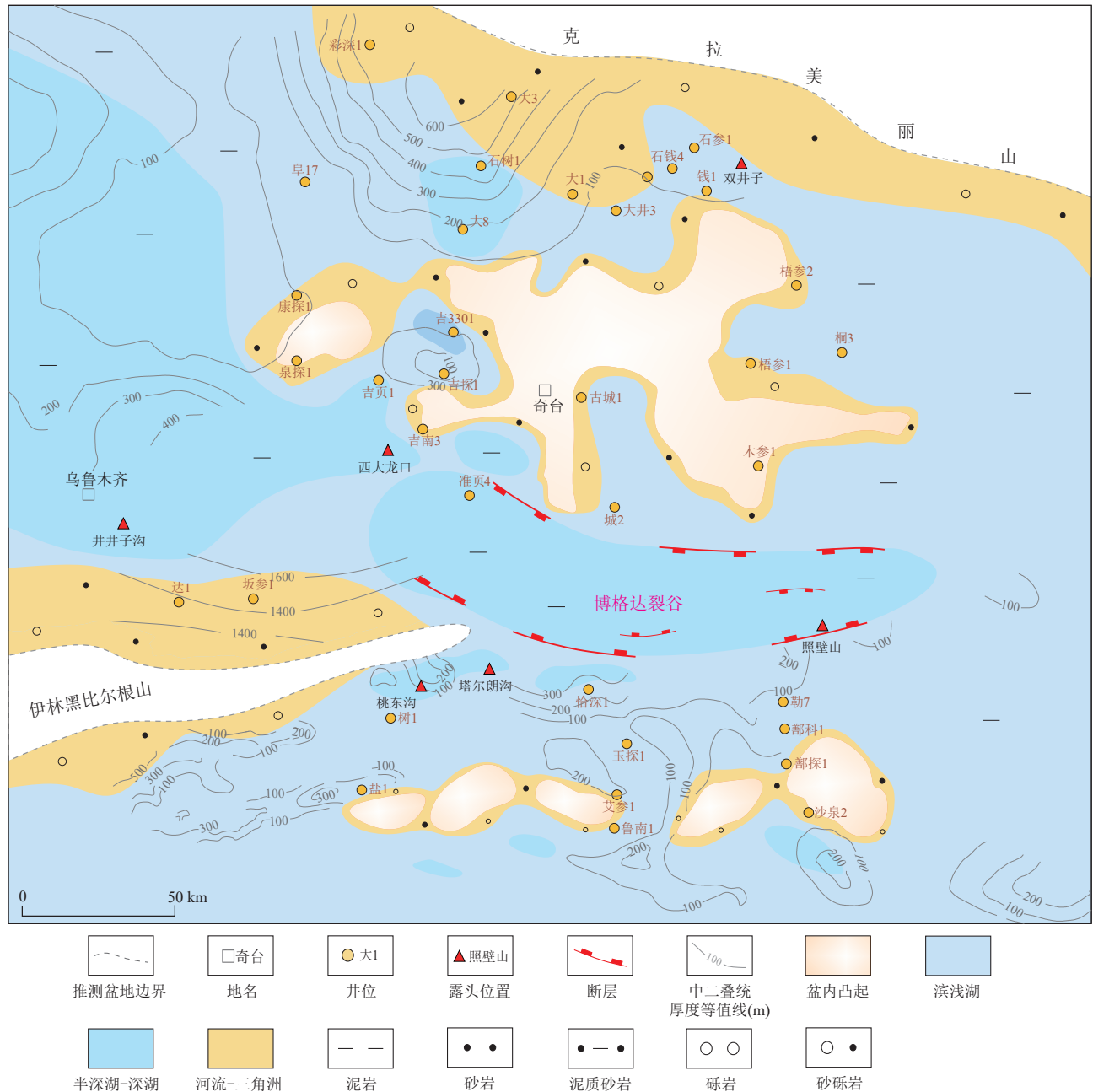


图7 博格达山及其周缘中二叠世构造-沉积环境分布特征

Fig. 7 Tectono-sedimentary environment of the Bogda Mountains and its adjacent areas during the Middle Permian

扇三角洲构成由厚层砾岩和砂砾岩转变为砂岩和泥岩的岩性序列^[42],其特征为下细上粗、交错层理发育。

3.4 沉积充填演化

博格达地区早二叠世发育浅海相与陆相的断陷湖盆沉积。北侧的准东地区下二叠统发育陆相沉积,由断陷盆地边缘到湖盆中心完整的沉积序列为:下部以湖相的扇三角洲型砂砾岩夹泥岩沉积为主,向上过渡为滨浅湖亚相的粉-细砂岩和泥岩,总体呈正粒序。海相沉积序列以乌鲁木齐附近的下二叠统出露的石人子沟组和

塔什库拉组为典型,发育海-陆交互的复理石建造和安加拉植物群以及少量海相动物化石(图10),且发育枕状玄武岩和流纹岩等双峰式火山岩建造。博格达山南侧的吐哈盆地下二叠统广泛发育的陆相火山岩和火山碎屑岩与准东地区存在显著差别,完整的沉积序列可分为3段:下部为灰岩和粉砂岩夹凝灰岩,中部为玄武岩,上部为黑色泥岩夹泥灰岩。沉积特征显示从乌鲁木齐至照壁山沉积环境由海相转变为陆相湖盆(图10)。

中二叠世博格达地区发育陆相的断陷-坳陷湖盆沉积体系,其中分布最广且最典型的沉积相类型为

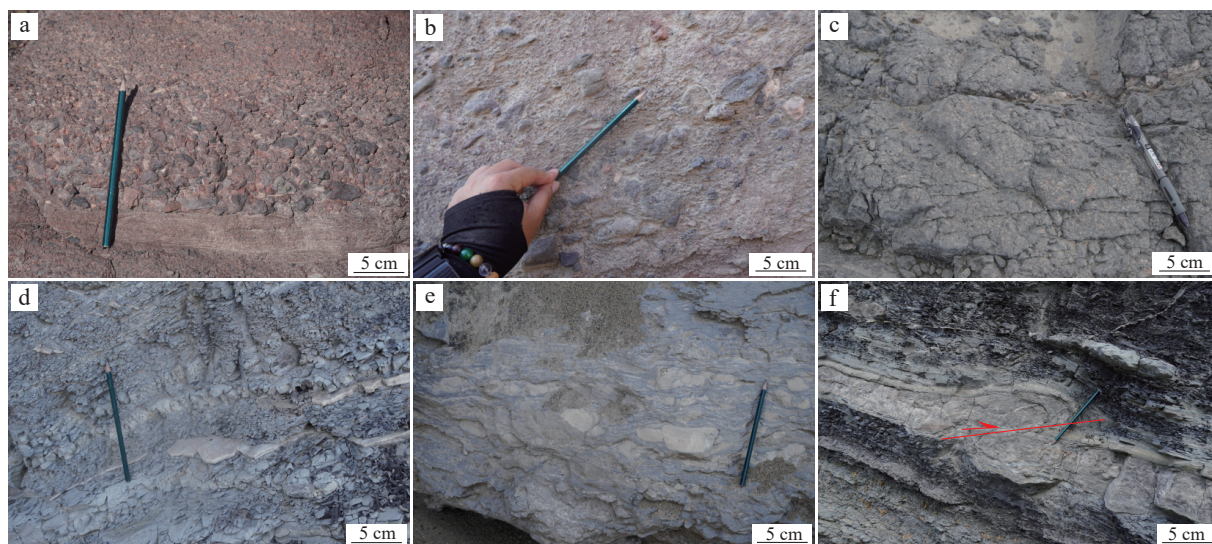


图8 博格达山南缘中二叠统野外露头照片

Fig. 8 Photos showing the Middle Permian outcrops along the southern margin of the Bogda Mountains

a. 大河沿组红色砂砾岩与含砾粗砾岩层呈正粒序(N 43°14'45.04", E 88°59'20.89"); b. 大河沿组砾岩, 砾石分选差, 次棱角状-次圆状, 砾石具定向性(N 43°14'45.04", E 88°59'20.89"); c. 大河沿组杏仁状玄武岩(N 43°14'35.87", E 89°0'17.63"); d. 塔尔朗组黑色泥页岩夹灰白色白云岩(N 43°17'0.85", E 89°2'38.59"); e. 塔尔朗组灰岩中的石香肠构造(N 43°16'52.73", E 89°2'27.71"); f. 塔尔朗组泥页岩与灰岩互层发育, 层内见剪切构造发育(N 43°16'52.47", E 89°2'25.07")

中-上部的半深湖-深湖亚相。博格达山北侧的淮南地区中二叠统下部乌拉泊组发育以粗砂岩和细砂岩夹泥岩为特征的扇三角洲沉积, 其上井子沟组则过渡为滨浅湖亚相的沉积序列, 发育凝灰岩和砂、泥岩, 见植物化石, 沉积水体浅(图10); 向上至芦草沟组, 水体加深, 沉积序列变为一套半深湖-深湖亚相的灰黑色和黑色泥页岩与炭质泥岩的细粒沉积(图10), 见泥灰岩或白云岩夹层, 该套地层在博格达山北缘广泛出露, 表现为黑色页岩夹白云岩, 且表面风化严重, 呈细小的片状和粉末状; 芦草沟组之上的红雁池组沉积环境与芦草沟组相似, 但该组岩性以泥质粉砂岩为主, 夹砾岩和灰岩, 水动力略强于博格达山北缘的芦草沟组, 为滨浅湖-半深湖环境(图6, 图8, 图10)。同时期在博格达山南侧的露头区, 中二叠统下部的大河沿组发育典型的辫状河-冲积扇沉积体系的杂色砾岩到含砾砂岩的正粒序沉积, 中部夹玄武岩, 其上塔尔朗组发育以半深湖-深湖亚相泥页岩为主的细粒沉积(图8, 图10), 总体呈现下部水体浅、上部水体深的沉积特征。

晚二叠世, 博格达山南、北两侧的沉积序列均为下部粗碎屑、向上变细粒的辫状河-三角洲(或冲积扇)-滨浅湖沉积体系。北侧的淮东地区边缘西大龙口地区泉子街组为冲积扇沉积, 下部以厚层砾岩为特征, 砾石分选和磨圆差, 其上梧桐沟组以辫状河沉积的粗砂岩和砂砾岩为主要特征, 发育交错层理, 见植物化石, 野

外露头区锅底坑组发育以泥岩夹细砂岩为特征的滨浅湖沉积, 与上覆的三叠系整合接触。在准噶尔盆地内部泉子街组几乎不发育, 以梧桐沟组发育为主, 其下部主要发育扇三角洲相的砂砾岩, 上部则以滨浅湖亚相的厚层泥岩和粉砂质泥岩为特征(图10)。前人对博格达山前的吉木萨尔凹陷梧桐沟组进行了详细的岩石学研究, 认为其砂岩类型主要为岩屑砂岩及少量岩屑长石砂岩, 成分成熟度和结构成熟度均较低^[57], 为近物源堆积的结果。博格达山南侧吐哈盆地的上二叠统泉子街组为一套灰色和杂色砂砾岩, 向上至梧桐沟组则以灰色泥岩和细砂岩以及杂色砂砾岩为主, 锅底坑组则为以深灰色和紫色泥岩为主, 见杂色砂砾岩, 纵向上三者砂砾岩逐渐减少, 泥岩增多, 构成下粗、上细的正粒序, 以辫状河-滨浅湖亚相沉积体系为主(图10)。

4 讨论

4.1 博格达山及其周缘二叠纪原型盆地性质

沉积序列上, 博格达山南侧及乌鲁木齐附近的井子沟下二叠统露头均发育粗粒沉积, 特别是吐哈盆地北部下二叠统发育的双峰式火山岩, 结合区域构造背景, 表明该时期两侧盆地处于伸展的构造环境, 且伸展应力可能在博格达山南侧的作用更加强烈。中二叠

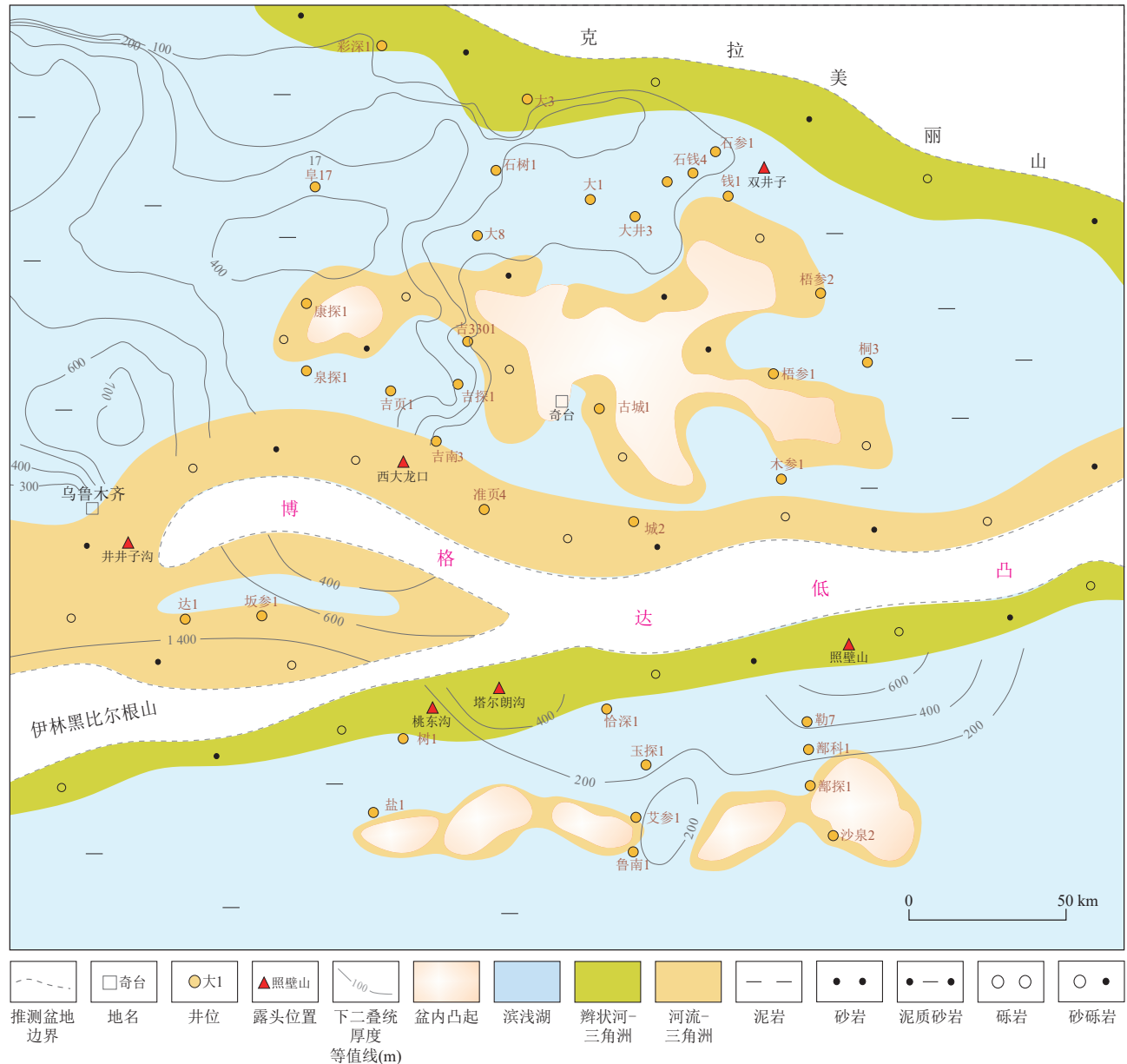


图9 博格达山及其周缘晚二叠世构造-沉积环境分布特征

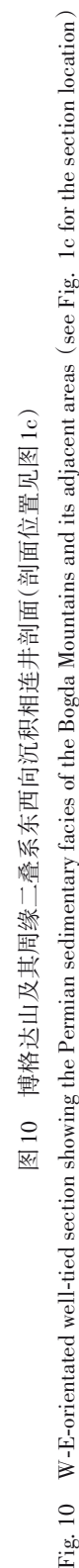
Fig. 9 Distribution of the tectono-sedimentary environment of the Bogda Mountains and its adjacent areas during the Late Permian

统下部发育粗碎屑,向上沉积粒度减小,且广泛发育深湖亚相泥页岩和灰岩,在博格达山南侧局部见火山岩发育,但其规模明显减小,表明中二叠世博格达地区的伸展作用逐渐减弱。至中二叠世末期,又出现了粗粒的砂砾岩,该时期水体同步变浅,且博格达两侧二叠系物源区发生了变化^[12],表明了该时期博格达地区开始转入挤压的构造环境,博格达裂谷开始发生回返。晚二叠世,发育下部砾岩、上部粉砂岩-泥岩的正粒序,指示了构造活动由强转弱。

晚二叠世梧桐沟组沉积时期,乌鲁木齐地区古流向优势方位由南东东向转变为近东向,且泉子街组与梧桐沟组的物源来源由中-下二叠统的岩浆弧变为再

循环造山,表明该时期西博格达地区已经隆升^[12, 58, 59],同时,在博格达山南缘的下二叠统依尔希土组观测到砾岩的长轴方向为南北向($5^{\circ} \sim 185^{\circ}$),上二叠统泉子街组砾岩的长轴方向为近东西向($89^{\circ} \sim 269^{\circ}$),表明水流方向发生了近 90° 的转变,证明了博格达山在二叠纪期间的隆升。同时也表明,在研究博格达山初始隆升时,除借助古流向分析和碎屑物源分析外,与造山带相邻盆地的沉积序列分析也是约束山体初始隆升的重要补充手段。

综上,博格达山两侧露头及盆地内钻井资料所揭示的沉积序列的变化与古流向和物源分析的结果相一致,即早二叠世博格达山及周缘在伸展作用下发育断



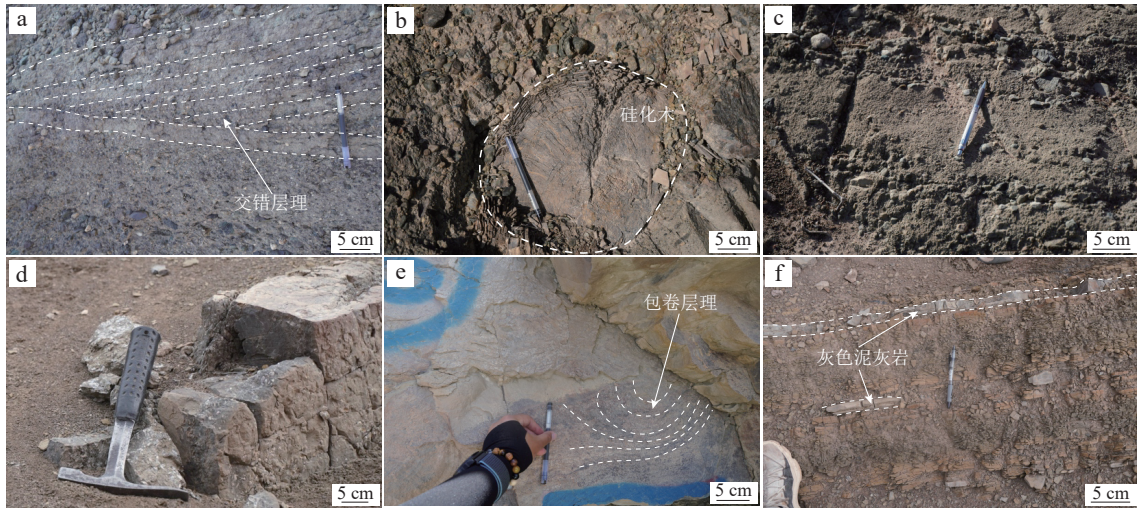


图11 博格达山南缘上二叠统沉积特征野外露头照片

Fig. 11 Photos showing the Upper Permian outcrops along the southern margin of the Bogda Mountains

a. 泉子街组砂砾岩与含砾粗砂岩,见交错层理(N 43°14'29.09", E 90°25'36.74"); b. 泉子街组砾岩,似硅化木(N 43°14'47.23", E 90°26'6.93"); c. 梧桐沟组含砾粗砂岩夹砾岩,砾岩具定向性(N 43°15'6.72", E 90°26'1.90"); d. 梧桐沟组泥岩的生屑灰岩夹层(N 43°15'3.97", E 88°58'7.31"); e. 梧桐沟组细砂岩,见包卷层理(N 43°15'6.94", E 88°58'7.72"); f. 锅底组泥岩和灰岩薄夹层(N 43°15'1.55", E 88°58'7.12")

陷盆地。结合区域构造背景,不难推断出早二叠世博格达山及周缘盆地为伸展断陷盆地,中二叠世伸展作用明显减弱,但博格达山南侧的吐哈盆地伸展作用强于北缘的准东地区,该时期进入断陷-拗陷的转化阶段,中二叠世晚期,区域挤压应力作用下,博格达裂谷回返,至晚二叠世,进入挤压高峰,两侧盆地开始进入前陆拗陷的发育阶段。

4.2 博格达山及其周缘二叠纪构造-沉积演化

由于晚石炭世的碰撞造山,二叠纪北疆地区沉积环境发生改变,由石炭纪的海相逐渐过渡为陆相,海水退出的过程中,北疆地区被陆相、海-陆过渡相和海相所覆盖。从早二叠世至晚二叠世,区域构造应力由伸展转变为挤压,构造应力叠加气候的影响,致使沉积基准面发生改变,导致沉积体系类型和沉积充填样式的变化。

乌鲁木齐地区下二叠统石人子沟组以粉-细砂岩和泥岩为主,整体上为一套浅海相的碎屑岩,其上塔什库拉组以细碎屑夹黑色页岩为主,见波痕和交错层理,为浅海相^[12, 59, 60]。白杨沟地区下二叠统露头的灰岩中见腕足类和珊瑚化石^[61],同样为典型的浅海相沉积。因此乌鲁木齐至吐哈盆地南缘,早二叠世为浅海相沉积环境,同时期准东地区及吐哈盆地北缘则陆相沉积。

早二叠世,博格达地区处于后碰撞伸展的构造环境,先存的石炭系断裂继续发育(图 12a),且伴随有双峰式火山岩的产生,下二叠统火山岩发育于博格达山南缘及吐哈盆地北部的依尔希土组,同时发育生长断

层^[62-64],二者共同指示了博格达地区处于同裂谷发育期,沉降及沉积中心为博格达裂谷,沉积相以冲积扇-湖泊相为主(图 12b),沉积相及沉积序列与早二叠世炎热的半湿润-半干旱气候条件相吻合^[65, 66]。

中二叠世从半干旱-半湿润气候转变为湿润-半湿润气候^[66, 67],沉积基准面降低,水体加深,发育水进沉积体系,且水体以还原环境为主^[68-72],伸展应力减弱,博格达山两侧的准东地区和吐哈盆地沉积充填以细粒的泥质沉积为主,且发育灰岩,指示了构造较为稳定的半深湖-深湖亚相(图 12c),该套沉积覆盖在早二叠世或石炭纪断陷之上,具有“填平补齐”的趋势,且在博格达山南、北两侧的盆地内具有相似性,不同的是博格达山南缘至吐哈盆地北缘的碎屑沉积中见玄武岩,表明博格达山南侧的构造活动强度高于准东和淮南地区,末期开始出现的粗粒沉积则表明构造环境开始发生变化,结合区域背景,该时期由弱伸展进入挤压的应力环境(图 12d)。

晚二叠世,博格达地区的气候由温暖、湿润-半湿润气候转变为炎热的半干旱气候^[67, 73, 74],沉积基准面升高,水体变浅,发育辫状河-三角洲(或冲积扇)-滨浅湖沉积体系。南北向连井剖面揭示上二叠统南部厚、北部薄,沉积充填也以底部厚层砾岩、上部砂岩为特征,表明晚二叠世进入强挤压的构造环境,同时期准噶尔盆地内与准东地区相邻的阜康凹陷已进入前陆盆地演化阶段^[51],因此推测博格达山两侧的准东地区和吐哈盆地的演化阶段与之一致,晚二叠世末期,挤压减弱,因此

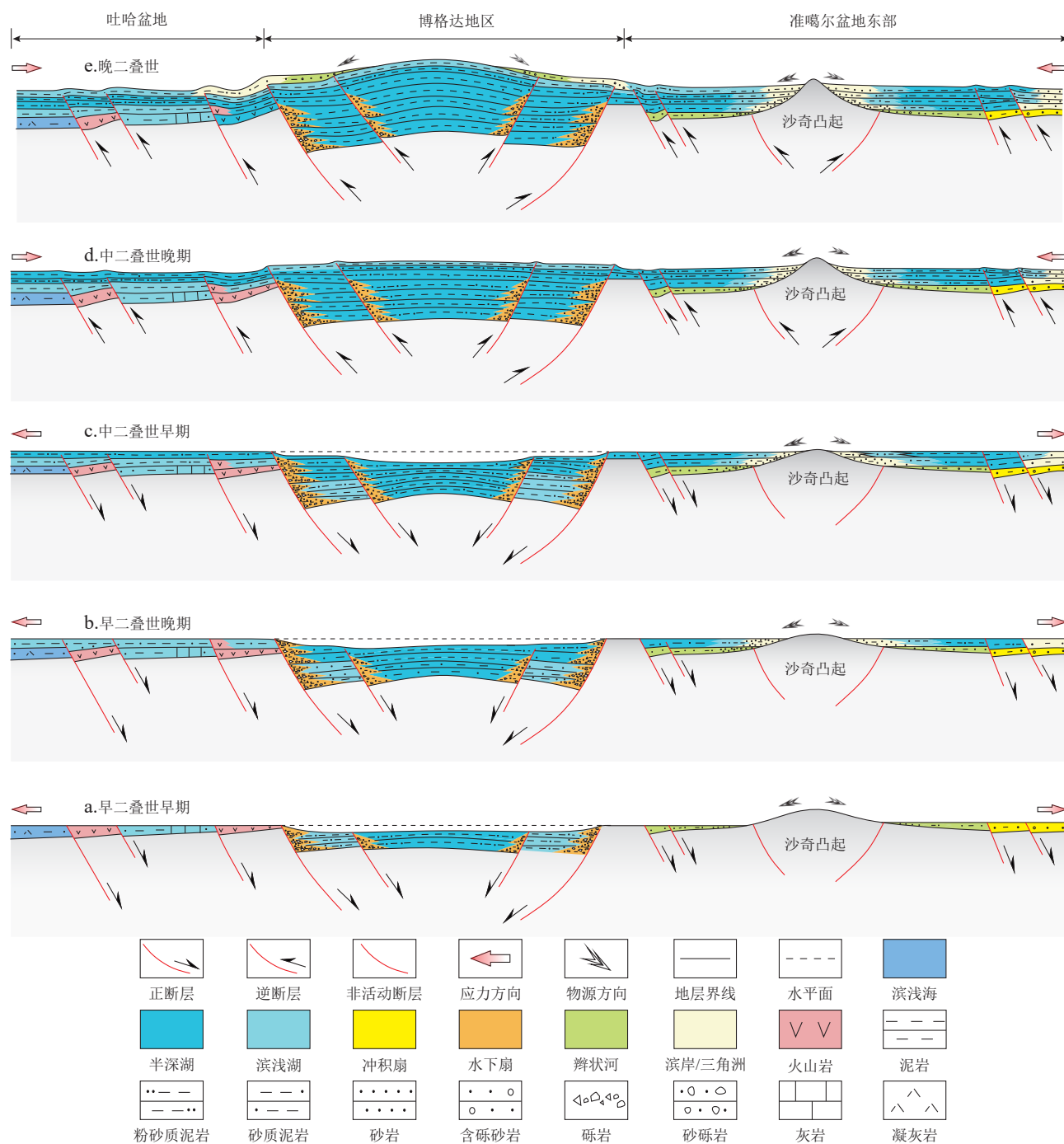


图12 准东地区-博格达地区-吐哈盆地二叠纪南北向构造-沉积演化模式

Fig. 12 N-S-orientated profiles showing the Permian tectono-sedimentary evolutionary patterns from the Turpan-Hami Basin to Bogda area, and then to the eastern Junggar Basin

在博格达地区形成了“下粗、上细”的正粒序(图12e)。

5 结论

1) 早二叠世, 博格达地区处于关键的构造-沉积变革期, 海水退出过程中沉积环境存在陆相、海-陆过渡相和海相, 在区域伸展的构造背景下发育裂陷盆地,

裂陷中心大致为现今博格达地区, 其周缘露头及两侧盆地内钻井揭示下二叠统发育裂谷型沉积, 垂向上底部发育冲积扇等粗碎屑沉积体系和双峰式火山岩建造, 以博格达山周缘露头区的水下滑塌堆积和博格达山南缘下二叠统露头及吐哈盆地内钻井为典型代表, 发育冲积扇-辫状河-扇三角洲沉积体系。

2) 中二叠世, 弱伸展的构造环境, 博格达裂谷持

续发育,湿润-半湿润气候条件下,沉积基准面不断降低,水体逐渐加深。早期仍维持伸展作用,裂谷持续发育,博格达山南侧及吐哈盆地内中二叠统大河沿组发育双峰式火山岩和冲积扇-辫状河沉积的厚层砾岩及砂砾岩;晚期,伸展应力减弱,发育坳陷型的滨浅湖-半深湖沉积,以芦苇沟组和塔尔朗沟组泥页岩夹碳酸盐岩为代表的细粒沉积为典型特征,垂向沉积序列发育以底部粗碎屑的砂砾岩,向上变为黑色泥页岩的滨浅湖-半深湖沉积体系,为构造趋于相对平静的坳陷期沉积,该时期博格达山南缘的伸展作用强于北缘的准东地区;末期,区域伸展应力转变为区域挤压应力,博格达地区先存的正断层开始发生反转,表现为中二叠统顶部砂砾岩增多,同时博格达裂谷开始回返。

3) 晚二叠世,持续的区域挤压应力环境下,博格达裂谷发生大规模反转,构造抬升,博格达隆升成为物源区,半干旱的气候条件下,沉积基准面上升,两侧盆地水体变浅,发育辫状河-三角洲(或冲积扇)-滨浅湖沉积体系,两侧盆地进入前陆坳陷的演化阶段,末期挤压减弱,发育以底部为粗碎屑的砂砾岩,向上过渡为灰色粉-细砂岩和红色泥岩为代表的正粒序沉积。

致谢:3位审稿人和编辑在论文修改过程中提出的宝贵意见和建议使我深受启发,在此致以衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] 何登发,陈新发,张义杰,等. 准噶尔盆地油气富集规律[J]. 石油学报, 2004, 25(3): 1-10.
HE Dengfa, CHEN Xinfu, ZHANG Yijie, et al. Enrichment characteristics of oil and gas in Jungar Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(3): 1-10.
- [2] HAN Yigui, ZHAO Guochun. 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 [J]. Earth-Science Reviews, 2018, 186: 129-152.
- [3] 李锦轶,肖序常,汤耀庆,等. 新疆东准噶尔卡拉麦里地区晚古生代板块构造的基本特征[J]. 地质评论, 1990, 36(4): 305-316.
LI Jinyi, XIAO Xuchang, TANG Yaoqing, et al. Main characteristics of Late Paleozoic plate tectonics in the southern part of East Junggar, Xinjiang [J]. Geological Review, 1990, 36(4): 305-316.
- [4] CARROLL A R, LIANG Yunhai, GRAHAM S A, et al. Junggar Basin, northwest China: Trapped Late Paleozoic ocean [J]. Tectonophysics, 1990, 181(1/4): 1-14.
- [5] CHEN Xijie, SHU Liangshu, SANTOSH M. Late Paleozoic post-collisional magmatism in the eastern Tianshan belt, northwest China: New insights from geochemistry, geochronology and petrology of bimodal volcanic rocks [J]. Lithos, 2011, 127(3/4): 581-598.
- [6] 成守德,王广瑞,杨树德,等. 新疆古板块构造[J]. 新疆地质, 1986, 4(2): 1-26.
CHENG Shoude, WANG Guangrui, YANG Shude, et al. The Paleoplate tectonic of Xinjiang [J]. Xinjiang Geology, 1986, 4(2): 1-26.
- [7] 方国庆. 新疆东部大地构造特点及演化[J]. 西北地质, 1991, 12(3): 6-11.
FANG Guoqing. Tectonic characteristics and evolution of eastern Xinjiang [J]. Northwestern Geology, 1991, 12(3): 6-11.
- [8] 方国庆. 博格达晚古生代岛弧的沉积岩石学证据[J]. 沉积学报, 1993, 11(3): 31-36.
FANG Guoqing. Sedimentological evidence of Late Palaeozoic Bogda island arc [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1993, 11(3): 31-36.
- [9] 顾连兴,胡受奚,于春水,等. 博格达陆内碰撞造山带挤压-拉张构造转折期的侵入活动[J]. 岩石学报, 2001, 17(2): 187-198.
GU Lianxing, HU Shouxi, YU Chunshui, et al. Intrusive activities during compression-extension tectonic conversion in the Bogda intrascontinental orogen [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(2): 187-198.
- [10] 王银喜,顾连兴,张遵忠,等. 博格达裂谷闭合和区域隆起的同位素年代学证据及地质意义[J]. 地球学报, 2005, 26(增刊1): 102-104.
WANG Yinxi, GU Lianxing, ZHANG Zunzhong, et al. Isotopic chronologic evidence of Bogda rift closure and regional uplift and its geological significance [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2005, 26(S1): 102-104.
- [11] LIU Dongdong, KONG Xiangye, ZHANG Chen, et al. Provenance and geochemistry of Lower to Middle Permian strata in the southern Junggar and Turpan basins: A terrestrial record from mid-latitude NE Pangea [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2018, 495: 259-277.
- [12] WANG Jian, CAO Yingchang, WANG Xintong, et al. Sedimentological constraints on the initial uplift of the West Bogda mountains in mid-Permian [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1453.
- [13] 史燕青. 准噶尔盆地东南缘中二叠世-早三叠世构造-古地理演化研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
SHI Yanqing. Tectono-paleogeographic evolution during the Middle Permian-Early Triassic in the southeastern margin of the Junggar Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020.
- [14] CHEN Ke, LIN Wei, WANG Qingchen. The Bogeda Shan uplifting: Evidence from multiple phases of deformation [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 99: 1-12.
- [15] WANG Jialin, WU Chaodong, ZHOU Tianqi, et al. Source-to-sink analysis of a transtensional rift basin from syn-rift to uplift stages [J]. Journal of Sedimentary Research, 2019, 89(4): 335-352.
- [16] GREENE T J, CARROLL A R, WARTES M, et al. Integrated provenance analysis of a complex orogenic terrane: Mesozoic uplift of the Bogda Shan and inception of the Turpan-Hami Basin, NW China [J]. Journal of Sedimentary Research, 2005, 75(2):

- 251-267.
- [17] ZHANG Lianchang, XIAO Wenjiao, QIN Kezhang, et al. Re-Os isotopic dating of molybdenite and pyrite in the Baishan Mo-Re deposit, eastern Tianshan, NW China, and its geological significance[J]. *Mineralium Deposita*, 2005, 39(8): 960-969.
- [18] 旷理雄, 郭建华, 梅廉夫, 等. 从油气勘探的角度论博格达山的隆升[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2005, 35(3): 346-350.
- KUANG Lixiong, GUO Jianhua, MEI Lianfu, et al. Study on the upheaval of the Bogeda mountain block from angle of oil and gas exploration [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2005, 35(3): 346-350.
- [19] 张传恒, 刘典波, 张传林, 等. 新疆博格达山初始隆升时间的地层学标定[J]. *地学前缘*, 2005, 12(1): 294-302.
- ZHANG Chuanheng, LIU Dianbo, ZHANG Chuanlin, et al. Stratigraphic constraints on the initial uplift age of Bogda Shan, Xinjiang, northwest China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(1): 294-302.
- [20] TANG Wenbin, ZHANG Yuanyuan, PE-PIPER G, et al. Permian to early Triassic tectono-sedimentary evolution of the Mahu Sag, Junggar Basin, western China: Sedimentological implications of the transition from rifting to tectonic inversion[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 123: 104730.
- [21] 方世虎, 贾承造, 郭召杰, 等. 准噶尔盆地二叠纪盆地属性的再认识及其构造意义[J]. *地学前缘*, 2006, 13(3): 108-121.
- FANG Shihu, JIA Chengzao, GUO Zhaojie, et al. New view on the Permian evolution of the Junggar Basin and its implications for tectonic evolution [J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(3): 108-121.
- [22] 吴庆福. 准噶尔盆地构造演化与找油领域[J]. *新疆地质*, 1986, 4(3): 1-19.
- WU Qingfu. Structure evolution and prospects of Junggar Basin [J]. *Xinjiang Geology*, 1986, 4(3): 1-19.
- [23] 陈书平, 张一伟, 汤良杰. 准噶尔晚石炭世—二叠纪前陆盆地的演化[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2001, 25(5): 11-15, 23.
- CHEN Shuping, ZHANG Yiwei, TANG Liangjie. Evolution of Junggar Late Carboniferous-Permian foreland basin [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2001, 25(5): 11-15, 23.
- [24] 陈新, 卢华复, 舒良树, 等. 准噶尔盆地构造演化分析新进展[J]. *高校地质学报*, 2002, 8(3): 257-267.
- CHEN Xin, LU Huaifu, SHU Liangshu, et al. Study on tectonic evolution of Junggar Basin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2002, 8(3): 257-267.
- [25] 吴孔友, 查明, 王绪龙, 等. 准噶尔盆地构造演化与动力学背景再认识[J]. *地球学报*, 2005, 26(3): 217-222.
- WU Kongyou, ZHA Ming, WANG Xulong, et al. Further researches on the tectonic evolution and dynamic setting of the Junggar Basin [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2005, 26(3): 217-222.
- [26] WANG Jialin, WU Chaodong, ZHOU Tianqi, et al. Source and sink evolution of a Permian-Triassic rift-drift basin in the southern Central Asian Orogenic Belt: Perspectives on sedimentary geochemistry and heavy mineral analysis [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 181: 103905.
- [27] YANG Wan, FENG Qiao, LIU Yiqun, et al. Depositional environments and cyclo- and chronostratigraphy of uppermost Carboniferous-Lower Triassic fluvial-lacustrine deposits, southern Bogda Mountains, NW China—A terrestrial paleoclimatic record of mid-latitude NE Pangea [J]. *Global and Planetary Change*, 2010, 73(1/2): 15-113.
- [28] YANG Yongqiang, QIU Longwei, WAN Ming, et al. Depositional model for a salinized lacustrine basin: The Permian Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin, NW China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 178: 81-95.
- [29] 鲁智帅, 谢庆宾, 张津宁, 等. 新疆博格达山北缘二叠纪中—晚期构造运动的沉积响应[J]. *地质论评*, 2024, 70(1): 102-122.
- LU Zhishuai, XIE Qingbin, ZHANG Jinning, et al. Sedimentary response of tectonic movement in the Middle and Late Permian in the northern margin of Bogda Mountain, Xinjiang [J]. *Geological Review*, 2024, 70(1): 102-122.
- [30] 王家林, 吴朝东, 朱文, 等. 准噶尔盆地南缘二叠纪—三叠纪构造—沉积环境与原型盆地演化[J]. *古地理学报*, 2016, 18(4): 643-660.
- WANG Jialin, WU Chaodong, ZHU Wen, et al. Tectonic-depositional environment and prototype basin evolution of the Permian-Triassic in southern Junggar Basin [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2016, 18(4): 643-660.
- [31] KRIVONOGOV S K, SAFONOVA I Y. Basin structures and sediment accumulation in the Baikal Rift Zone: Implications for Cenozoic intracontinental processes in the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Gondwana Research*, 2017, 47: 267-290.
- [32] ŞENGÖR A M C, NATAL'IN B A, BURTMAN V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia [J]. *Nature*, 1993, 364(6435): 299-307.
- [33] MOSSAKOVSKY A. Central Asian fold belt: Geodynamic evolution and history of formation [J]. *Geotectonics*, 1993, 6: 3-33.
- [34] KHAIN E V, BIBIKOVA E V, SALNIKOVA E B, et al. The Palaeo-Asian ocean in the Neoproterozoic and Early Palaeozoic: New geochronologic data and palaeotectonic reconstructions [J]. *Precambrian Research*, 2003, 122(1/4): 329-358.
- [35] WINDLEY B F, ALEXEIEV D, XIAO Wenjiao, et al. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164(1): 31-47.
- [36] XIAO Wenjiao, HUANG Baochun, HAN Chunming, et al. A review of the western part of the Altaids: A key to understanding the architecture of accretionary orogens [J]. *Gondwana Research*, 2010, 18(2/3): 253-273.
- [37] CARROLL A R, GRAHAM S A, HENDRIX M S, et al. Late Paleozoic tectonic amalgamation of northwestern China: Sedimentary record of the northern Tarim, northwestern Turpan, and southern Junggar Basins [J]. *GSA Bulletin*, 1995, 107(5): 571-594.
- [38] 何登发, 翟光明, 况军, 等. 准噶尔盆地古隆起的分布与基本特征[J]. *地质科学*, 2005, 40(2): 248-261, 304.
- HE Dengfa, ZHAI Guangming, KUANG Jun, et al. Distribution and tectonic features of paleo-uplifts in the Junggar Basin [J].

- Chinese Journal of Geology, 2005, 40(2): 248-261, 304.
- [39] LIU Dadong, FAN Qingqing, ZHANG Chen, et al. Paleoenvironment evolution of the Permian Lucaogou Formation in the southern Junggar Basin, NW China [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2022, 603: 111198.
- [40] 孙天鸽. 吐哈盆地石炭-二叠系构造-地层层序与沉积充填演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- SUN Tiange. Tectonic-stratigraphic sequences and sedimentary filling of Carboniferous to Permian in Turpan-Hami Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [41] 王新桐. 博格达山周缘二叠系-侏罗系地层格架及沉积演化[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
- WANG Xintong. Stratigraphic framework and sedimentary evolution of the Permian-Jurassic strata in the surrounding area of the Bogda mountains [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [42] 杨有星, 张君峰, 张金虎, 等. 新疆博格达山周缘中上二叠统与中上三叠统沉积特征及其主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(4): 670-682.
- YANG Youxing, ZHANG Junfeng, ZHANG Jinhu, et al. Sedimentary characteristics and main controlling factors of the Middle-Upper Permian and Middle-Upper Triassic around Bogda Mountain of Xinjiang, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(4): 670-682.
- [43] 高洪林, 穆治国, 靳新娣, 等. 新疆吐哈盆地南北缘石炭纪火山岩铂族元素配分及其指示意义[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(3): 385-393.
- GAO Honglin, MU Zhiguo, JIN Xindi, et al. PEGs abundance patterns and its implications of Carboniferous volcano zone to south and north of Turpan-Hami Basin, Xinjiang Uigur Autonomous Region [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2001, 37(3): 385-393.
- [44] 郭威, 周鼎武, 欧阳征建, 等. 博格达山南缘达坂城东沟乡二叠纪岩浆岩及其形成地质环境[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2009, 37(1): 103-108.
- GUO Wei, ZHOU Dingwu, OUYANG Zhengjian, et al. Formation and its geological environment of the Permian magmatic rocks in Donggou county, Daban city, southern margin of Bogeda orogenic belt [J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2009, 37(1): 103-108.
- [45] 周鼎武, 柳益群, 邢秀娟, 等. 新疆吐-哈、三塘湖盆地二叠纪玄武岩形成古构造环境恢复及区域构造背景示踪[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2006, 36(2): 143-153.
- ZHOU Dingwu, LIU Yiqun, XING Xiujuan, et al. Reconstruction of the palaeotectonic environment and tracing of the regional tectonic setting for Permian basalts in the Turpan-Hami and Santanghu basins, Xinjiang [J]. Science China Earth Sciences, 2006, 36(2): 143-153.
- [46] 邢秀娟, 周鼎武, 柳益群, 等. 吐-哈盆地及周缘早二叠世火山岩地球化学特征及大地构造环境探讨[J]. 新疆地质, 2004, 22(1): 50-55.
- XING Xiujuan, ZHOU Dingwu, LIU Yiqun, et al. Geochemistry of Early Permian volcanic rocks and their tectonic settings from the Turpan-Hami Basin, Xinjiang [J]. Xinjiang Geology, 2004, 22(1): 50-55.
- [47] 欧阳征建, 周鼎武, 林晋炎, 等. 博格达山白杨河地区中基性岩墙地球化学特征及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2006, 30(4): 495-503.
- OUYANG Zhengjian, ZHOU Dingwu, LIN Jinyan, et al. Geochemistry and geological implications of the Baiyanghe basic-intermediate dyke swarm in the Bogda orogenic belt in Xinjiang, China [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2006, 30(4): 495-503.
- [48] 王国灿, 张孟, 冯家龙, 等. 东天山新元古代-古生代大地构造格架与演化新认识[J]. 地质力学学报, 2019, 25(5): 798-819.
- WANG Guocan, ZHANG Meng, FENG Jialong, et al. New understanding of the tectonic framework and evolution during the Neoproterozoic-Paleozoic era in the east Tianshan mountains [J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(5): 798-819.
- [49] 王国灿, 张孟, 张雄华, 等. 天山东段“北天山洋”构造涵义及演化模式再认识[J]. 地质学报, 2022, 96(10): 3494-3513.
- WANG Guocan, ZHANG Meng, ZHANG Xionghua, et al. Re-understanding on the tectonic implication and evolution model of the “North Tianshan Ocean” from the eastern Tianshan area, Xinjiang, NW China [J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(10): 3494-3513.
- [50] WARTES M A, CARROLL A R, GREENE T J. Permian sedimentary record of the Turpan-Hami basin and adjacent regions, northwest China: Constraints on postamalgamation tectonic evolution [J]. GSA Bulletin, 2002, 114(2): 131-152.
- [51] 殷树铮, 何登发, 郭文建. 准噶尔盆地阜康凹陷二叠纪盆地属性与构造-沉积演化[J]. 地质学报, 2024, 98(12): 3647-3661.
- YIN Shuzheng, HE Dengfa, GUO Wenjian. The attribute and tectono-sedimentary evolution of the Fukang Sag, Junggar basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2024, 98(12): 3647-3661.
- [52] 郭威. 新疆博格达山及其邻区板内构造作用研究[D]. 西安: 西北大学, 2008.
- GUO Wei. Intraplate tectonics of Bogda Mountain in Xinjiang and its adjacent plates [D]. Xi'an: Northwest University, 2008.
- [53] 郭威, 周鼎武, 欧阳征建, 等. 博格达二叠纪区域伸展背景下的滑塌堆积特征[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2011, 41(4): 658-662, 675.
- GUO Wei, ZHOU Dingwu, OUYANG Zhengjian, et al. Structure features of olistostrome under Permian extension environment in Bogda Mountain region [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2011, 41(4): 658-662, 675.
- [54] 舒良树, 朱文斌, 王博, 等. 新疆博格达南缘后碰撞期陆内裂谷和下水滑塌构造[J]. 岩石学报, 2005, 21(1): 25-36.
- SHU Liangshu, ZHU Wenbin, WANG Bo, et al. The post-collision intracontinental rifting and olistostrome on the southern slope of Bogda mountains, Xinjiang [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(1): 25-36.
- [55] 张义杰, 齐雪峰, 程显胜, 等. 准噶尔盆地晚石炭世和二叠纪沉积环境[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(6): 673-675.
- ZHANG Yijie, QI Xuefeng, CHENG Xiansheng, et al. Approach to sedimentary environment of late Carboniferous-Permian in Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(6): 673-675.

- [56] 冯增昭. 中国沉积学[M]. 2版. 北京: 石油工业出版社, 2013.
FENG Zengzhao. Sedimentology of China[M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [57] 但顺华, 陈春勇, 向辉, 等. 吉木萨尔凹陷二叠系梧桐沟组沉积演化规律[J]. 新疆石油天然气, 2018, 14(2): 17-22, 27.
DAN Shunhua, CHEN Chunyong, XIANG Hui, et al. Sedimentary evolution of the Permian Wutonggou Formation in Jimusaer Sag, Junggar Basin[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2018, 14(2): 17-22, 27.
- [58] 韩祥磊. 吐哈盆地塔朗组沉积特征及烃源岩潜力分析[J]. 特种油气藏, 2018, 25(3): 18-22.
HAN Xianglei. Sedimentary pattern and source-rock potential of Taerlang Formation in Turpan-Hami Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(3): 18-22.
- [59] 李玮, 胡健民, 黎敦朋, 等. 新疆博格达山北缘晚古生代-中生代古水流样式转折及其构造意义[J]. 沉积学报, 2007, 25(2): 283-292.
LI Wei, HU Jianmin, LI Dunpeng, et al. Analysis of the Late Paleozoic and Mesozoic paleocurrents and its constructional significance of the northern Bogdashan, Xinjiang[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(2): 283-292.
- [60] 庞志超, 焦悦, 袁波, 等. 准噶尔盆地南缘二叠-三叠纪原型盆地性质与沉积环境演化[J]. 地质学报, 2020, 94(6): 1813-1838.
PANG Zhichao, JIAO Yue, YUAN Bo, et al. Permian-Triassic depositional environmental evolution and the prototype basin of the southern Junggar Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(6): 1813-1838.
- [61] 张关龙, 王越. 准噶尔盆地早二叠世构造-沉积格局及石油地质意义[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(1): 35-48.
ZHANG Guanlong, WANG Yue. Tectono-sedimentary framework of Early Permian in Junggar Basin and its petroleum geological significance[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(1): 35-48.
- [62] LIU Dongdong, CHENG Feng, GUO Zhaojie, et al. Lahar facies of the Latest Paleozoic Arbasay Formation: Geomorphological characters and paleoenvironment reconstruction of Northern Tian Shan, NW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 113(Part 1): 282-292.
- [63] SHU Liangshu, WANG Bo, ZHU Wenbin, et al. Timing of initiation of extension in the Tianshan, based on structural, geochemical and geochronological analyses of bimodal volcanism and olistostrome in the Bogda Shan (NW China)[J]. International Journal of Earth Sciences, 2011, 100(7): 1647-1663.
- [64] WALI G, WANG Bo, CLUZEL D, et al. 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[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018, 153: 238-251.
- [65] 吴绍祖. 新疆早二叠世古气候[J]. 新疆地质, 1996, 14(3): 270-277.
WU Shaozu. Paleoclimate of Lower Permian in Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 1996, 14(3): 270-277.
- [66] YANG Wan, LIU Yiqun, FENG Qiao, et al. Sedimentary evidence of Early-Late Permian mid-latitude continental climate variability, southern Bogda mountains, NW China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007, 252(1/2): 239-258.
- [67] 史燕青, 王剑, 张国一, 等. 新疆博格达地区中二叠世一早三叠世构造-气候-沉积演化及耦合机制[J]. 古地学报, 2021, 23(2): 389-404.
SHI Yanqing, WANG Jian, ZHANG Guoyi, et al. Tectono-climatic-sedimentary evolution and coupling mechanism during the Middle Permian-Early Triassic in Bogda area, Xinjiang[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2021, 23(2): 389-404.
- [68] CARROLL A R, BRASSELL S C, GRAHAM S A. Upper Permian lacustrine oil shales, southern Junggar Basin, northwest China[J]. AAPG Bulletin, 1992, 76(12): 1874-1902.
- [69] 王正和, 周继兵, 余谦, 等. 准噶尔盆地南缘芦草沟组碳质细粒沉积岩地球化学特征及地质背景[J]. 东北石油大学学报, 2018, 42(1): 86-95, 120.
WANG Zhenghe, ZHOU Jibing, YU Qian, et al. Geochemistry and its geological background of the carbonaceous-grained sedimentary rocks in Lucaogou Formation, southern Junggar Basin, NW China[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2018, 42(1): 86-95, 120.
- [70] 张奎华, 宋明水, 曹忠祥, 等. 博格达地区中二叠统沉积环境与烃源岩特征[J]. 断块油气田, 2021, 28(1): 9-13.
ZHANG Kuihua, SONG Mingshui, CAO Zhongxiang, et al. Sedimentary environment and the characteristics of hydrocarbon source rock of the Middle Permian in Bogda area[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2021, 28(1): 9-13.
- [71] 张逊, 庄新国, 涂其军, 等. 淮南与柴窝堡凹陷芦草沟组页岩地球化学特征对比与古环境恢复[J]. 新疆地质, 2016, 34(3): 423-427.
ZHANG Xun, ZHUANG Xinguo, TU Qijun, et al. Difference of geochemical characteristics and paleoenvironment reconstruction of the Lucaogou Formation between southern Junggar Basin and Chaiwopu Sag[J]. Xinjiang Geology, 2016, 34(3): 423-427.
- [72] 石军, 邹艳荣, 余江, 等. 准噶尔盆地阜康凹陷芦草沟组高有机碳页岩发育的古环境[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(8): 1138-1150.
SHI Jun, ZOU Yanrong, YU Jiang, et al. Paleoenvironment of organic-rich shale from the Lucaogou Formation in the Fukang Sag, Junggar Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(8): 1138-1150.
- [73] 李强, 吴绍祖, 屈迅, 等. 试论准噶尔石炭纪-三叠纪重要气候事件[J]. 新疆地质, 2002, 20(3): 192-195.
LI Qiang, WU Shaozu, QU Xun, et al. Key climatic events during Carboniferous-Triassic in Junggar[J]. Xinjiang Geology, 2002, 20(3): 192-195.
- [74] GAO Yuan, HUANG He, TAO Huifei, et al. Paleoenvironmental setting, mechanism and consequence of massive organic carbon burial in the Permian Junggar Basin, NW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2020, 194: 104222.