

银额盆地北部杭乌拉地区下二叠统双堡塘组沉积相及地质意义

杨立业

普洱学院茶叶咖啡学院, 云南 普洱

收稿日期: 2026年7月9日; 录用日期: 2026年8月19日; 发布日期: 2026年8月27日

摘要

银额盆地晚古生代盆地构造属性长期存在裂谷盆地、残余洋盆和弧后盆地等不同认识, 制约了区域沉积演化及上古生界油气勘探研究。本文以银额盆地北部杭乌拉地区下二叠统双堡塘组为研究对象, 采用野外实测、岩相分析及砂岩QFL物源判别等方法, 对其沉积相特征、沉积环境及构造背景进行了研究。结果表明: 双堡塘组发育无障碍陆源碎屑海岸和浅海碳酸盐台地两大沉积体系, 其中无障碍陆源碎屑海岸相包括过渡带、临滨和前滨亚相, 碳酸盐台地相包括台缘滩、开阔台地和局限台地亚相。砂岩QFL物源判别结果显示, 样品主要落入火山弧及再旋回造山带物源区, 反映物源来自活动大陆边缘。综合沉积相特征、QFL物源判别结果及区域岩浆活动、锆石年代和构造演化资料分析, 认为杭乌拉地区早二叠世为活动大陆边缘背景下的弧后盆地环境, 该认识主要适用于杭乌拉地区, 其区域适用性仍需进一步验证。其中, 前滨与临滨砂岩、台缘滩生屑灰岩具有较好的储集潜力, 过渡带及局限台地细粒暗色沉积可作为有效烃源岩和区域性盖层, 该结果可为杭乌拉地区及银额盆地北部上古生界油气勘探提供沉积学参考。

关键词

银额盆地, 双堡塘组, 沉积相, 弧后盆地, 储层潜力

Sedimentary Facies and Geological Significance of the Lower Permian Shuangputang Formation in the Hangwula Area, Northern Yin'e Basin

Liye Yang

School of Tea and Coffee, Pu'er University, Pu'er Yunnan

Received: July 9, 2026; accepted: August 19, 2026; published: August 27, 2026

文章引用: 杨立业. 银额盆地北部杭乌拉地区下二叠统双堡塘组沉积相及地质意义[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(8): 1293-1306. DOI: 10.12677/ag.2026.168115

Abstract

The tectonic nature of the Late Paleozoic Yin'e Basin has long been debated, with various interpretations including rift basin, remnant oceanic basin, and back-arc basin, which have hindered studies on regional sedimentary evolution and Upper Paleozoic hydrocarbon exploration. This paper focuses on the Lower Permian Shuangputang Formation in the Hangwula area of the northern Yin'e Basin. Through field measurements, lithofacies analysis, and sandstone QFL provenance discrimination, we investigate the sedimentary facies characteristics, depositional environments, and tectonic setting. The results indicate that the Shuangputang Formation comprises two major depositional systems: a barrier-free terrigenous clastic coast and a shallow-marine carbonate platform. The barrier-free terrigenous clastic coast includes transitional, shoreface, and foreshore subfacies, while the carbonate platform consists of platform-margin bank, open platform, and restricted platform subfacies. QFL provenance discrimination shows that the samples mainly fall into the fields of volcanic arc and recycled orogenic belt provenances, suggesting derivation from an active continental margin. Integrating sedimentary facies, QFL data, regional magmatism, zircon geochronology, and tectonic evolution, we propose that the Hangwula area was deposited in a back-arc basin setting on an active continental margin during the Early Permian. This interpretation is primarily applicable to the Hangwula area and requires further verification for regional extension. Among these, the foreshore and shoreface sandstones, as well as the platform-margin bioclastic limestones, exhibit good reservoir potential, while the fine-grained dark deposits of the transitional zone and restricted platform may serve as effective source rocks and regional seals. These results provide sedimentological references for hydrocarbon exploration in the Upper Paleozoic of the Hangwula area and the northern Yin'e Basin.

Keywords

Yin'e Basin, Shuangputang Formation, Sedimentary Facies, Back-Arc Basin, Reservoir Potential

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

银额盆地属晚古生代 - 中生代叠合型盆地, 当前油气勘探程度仍处于较低水平。近年来通过开展基础地质调查与油气资源评价研究, 已在构造单元划分、沉积充填特征、岩浆活动规律及油气地质条件等方面取得重要进展[1]-[9]。关于盆地构造演化研究普遍认为: 晚古生代古亚洲洋闭合导致的构造挤压作用, 使得石炭系 - 二叠系经历强烈变形并遭受大面积抬升剥蚀, 长期被视为中生代盆地基底, 传统观点认为其不具备油气成藏条件。相比之下, 针对中生代坳陷的研究则更为深入[10]-[13], 多数学者认为中生代地层是油气勘探的主要目标层系[14]-[18]。值得注意的是, 卢进才等(2017)通过综合地质调查与地球物理勘探成果, 重新厘定了石炭系 - 二叠系地层单元, 明确提出该时期银额盆地具有裂谷盆地特征, 并发现多套巨厚且广泛分布的中 - 高有机质丰度烃源岩, 其干酪根类型优良且成熟度适中, 揭示了上古生界潜在的油气资源潜力[19]。后续研究进一步确认盆地存在石炭 - 二叠纪与白垩纪两期叠合盆地体系[20] [21], 并在哈日凹陷(延哈参 1 井)、天草凹陷(天 6 井)等钻探工程中获得高产油气流[10] [22], 证实了石炭系 - 二叠系的油气勘探价值。然而, 关于该时期盆地类型仍存在显著争议: 既有裂谷盆地[23] [24]、残余洋盆等观点[25], 也有学者提出弧后盆地模型[26] [27], 甚至存在关于盆地完整性的不同认识。比如, 崔海峰

等(2023)认为该时期盆地并非统一整体,而是由南北向分布的残余洋盆与岛弧相关盆地拼合而成[14]。

不同构造背景和变形样式导致盆地类型和充填模式的差异,影响油气成藏和未来的勘探方向。鉴于此,本文选取早二叠世双堡塘组碎屑岩-碳酸盐岩沉积序列为研究对象,通过开展沉积相划分与沉积环境分析,结合前人研究成果系统探讨盆地类型,以期完善银额盆地晚古生代构造演化理论框架,为明确油气勘探目标层系、优化勘探部署提供更多地质依据。

2. 区域地质背景和地层

2.1. 区域地质背景

银额盆地位于内蒙古自治区西部(东经 97°~108°,北纬 40°~43°),北接蒙古国南戈壁省,呈菱形展布,面积约 12.3 万平方千米。该盆地地处华北板块、塔里木板块、西伯利亚板块与哈萨克斯坦板块交汇部位[28]-[30],作为晚古生代与中生代叠合盆地,其构造演化具有多阶段性[1][31]。盆地主体构造格局包含 4 个二级构造单元:北部黑鹰山-额济纳旗坳陷带、中部马鬃山-拐子湖隆起带、南部柳园-巴丹吉林坳陷带以及东部巴彦诺日公陆相断陷带[32][33](图 1)。

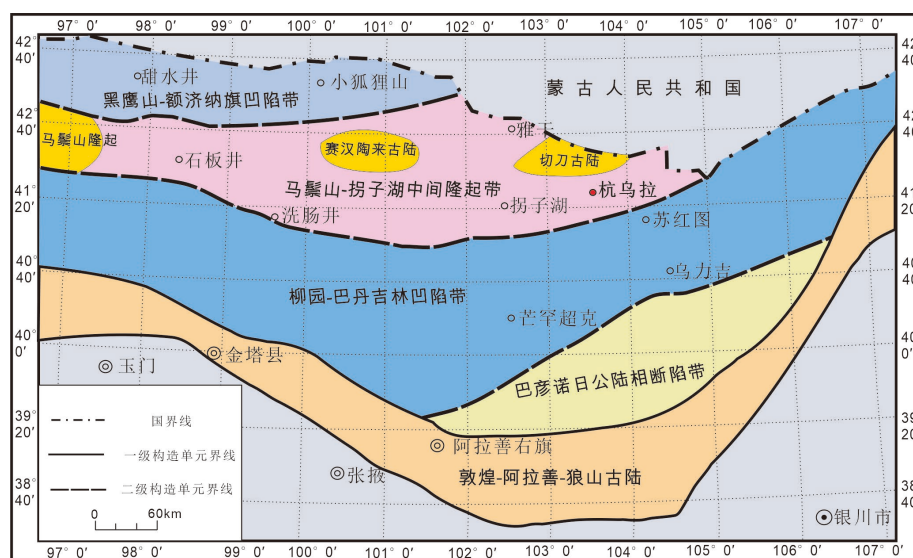


Figure 1. Carboniferous-Permian tectonic units of the Yingen-Ejin Basin and adjacent areas (modified from [34])

图 1. 银额盆地及邻区石炭纪-二叠纪构造单元划分(改自[34])

研究表明,该盆地具有显著的双层结构特征[14],晚古生代时期伴随古亚洲洋闭合过程,形成了巨厚火山岩-碎屑岩-碳酸盐岩建造,经历强烈构造抬升后整体呈现造山带属性[35];中生代转为伸展构造体制,发育近东西向断陷盆地群,广泛沉积陆相碎屑岩系[36],中生界侏罗系至白垩系则以河流-冲积扇、三角洲及湖泊相沉积为主,其中早侏罗世晚期-中侏罗世早期和早白垩世早期发育具有生烃潜力的湖相暗色泥岩及油页岩层;新生代受印度-欧亚板块碰撞影响,盆地转为挤压抬升背景,中北部构造活动趋缓,形成改造型残余盆地,基本延续中生代晚期构造格局[1]。

2.2. 双堡塘组的岩性与时代

双堡塘组(P_1sb)早期被定义为下部海相碎屑岩与上部火山岩的组合,含晚石炭世腕足类化石。1967年,郭敬信等在北山地区重新实测剖面时,依据采集的腕足类、头足类、腹足类及珊瑚化石组合,将下部碎

屑岩独立为“双堡塘组”，上部火山岩划归“梧桐沟组”，并将其时代修正为早二叠世。宁夏地质矿产局1:20 万区调工作将下二叠统划分为埋汗哈达组与阿其德组，其岩性及生物特征与北山双堡塘组具有良好对应性[37]。内蒙古自治区岩石地层(1996)进一步整合菊石滩组等单元，将浅海碎屑岩统一归入双堡塘组，基性火山岩划入金塔组[38]。

关于双堡塘组的时代，杨式溥(1987)在与之可对比的菊石滩组碎屑岩段上部发现早二叠世特征腕足化石 *Uncinunellina cf. mongolicus* Grabau [39]；宁夏地质队在杭乌拉地区埋汗哈达组与阿其德组中系统采集的腕足类化石组合，与天山-兴安地槽带早二叠世地层具高度相似性；尹海权(2016)综合古生物证据与碎屑锆石 U-Pb 定年数据(最年轻峰值 299 Ma)，限定该组沉积时代为早二叠世[26]。

3. 剖面位置、岩性及方法

3.1. 剖面位置及岩性

实测剖面位于内蒙古自治区阿拉善左旗杭乌拉西南部(图 2)，自下而上的陆缘碎屑岩-生物碎屑灰岩夹硅质岩组合为本文的研究材料。

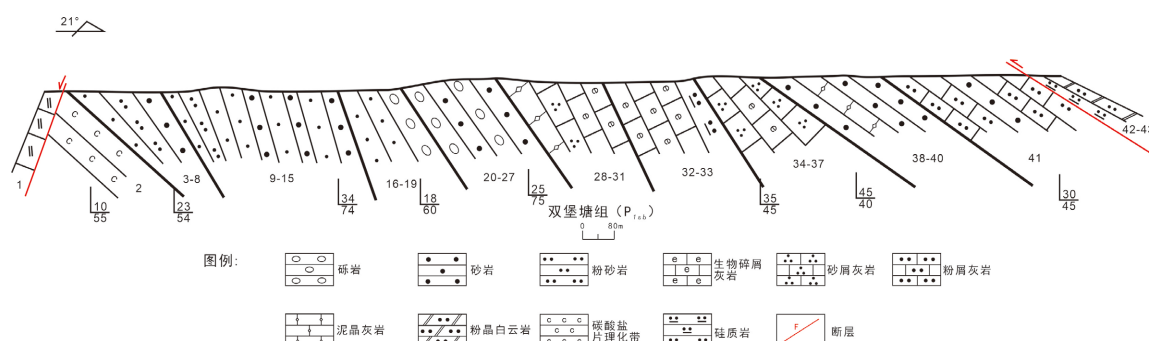


Figure 2. Measured stratigraphic section of the Shuangputang Formation in the Hangwula area, Inner Mongolia

图 2. 内蒙古杭乌拉地区双堡塘组实测地层剖面图

3.2. 研究方法

野外期间，对出露地层开展了系统的剖面勘察、采样及拍照工作，重点记录了岩层颜色、结构、构造、产状及化石组合等特征。后续室内工作中，则使用偏光显微镜观察岩石薄片，对其颗粒组成、粒度、分选等特征进行了详细观察、统计和分析，以揭示其岩石组分、沉积结构及成岩作用等特征。

之后，主要依据岩石的颜色、成分、结构及构造等宏观与微观特征重点开展了沉积相划分。其中，沉积岩颜色作为直观判别指标，对地层划分及古环境重建具有重要价值。研究表明，岩层色调的差异(如红色氧化环境与灰色还原环境的对比)可有效指示沉积条件的转变[40]。典型沉积构造的识别在相分析中具有关键作用，特别是碎屑岩中保存完好的原生物理沉积构造(如交错层理、波痕等)，其形态特征可直接反映水动力强度与介质运移方式[41] [42]。此外，岩石类型组合的垂向序列(如砂泥岩互层与厚层块状砂岩的对比)及其空间配置关系，为沉积体系识别提供了重要鉴别标志[43]。

同时，结合区域地质背景，参考经典相模式及前人研究案例，综合岩性组合序列、沉积构造及古生物证据，建立了该剖面的沉积相划分方案。

4. 沉积序列特征

野外露头显示，该套碎屑岩序列以灰绿、灰褐及灰紫色为主，后期构造改造作用显著，出露连续性较差，表现为强烈片理化特征，原始沉积构造识别困难，仅在个别层位可辨识冲刷充填构造。沉积旋回

特征在局部完整剖面中得以保存, 表现为厚层至薄层砾岩-砂岩-粉砂岩韵律组合。青灰色中厚层碳酸盐岩和以夹层形式出露的灰黑色硅质岩在剖面中上位置出现, 生物碎屑灰岩中可见腕足类、海百合茎等化石碎片。

经室内偏光显微镜观察分析, 碎屑岩主要为含砾粗粒长石岩屑砂岩、中粒长石岩屑砂岩、细粒长石岩屑砂岩、泥质粉砂岩等正常陆源碎屑岩; 碳酸盐岩主要为生屑灰岩, 也有泥晶灰岩、白云质灰岩及砂屑灰岩等岩石类型, 可能反映多期次沉积改造过程; 灰黑色硅质岩, 则以生屑硅质岩为主。

鉴于剖面以陆源碎屑岩和碳酸盐岩夹硅质岩的明显“二元”沉积序列, 选取可代表两段岩性特征的含砾长石岩屑砂岩和生屑灰岩以及硅质岩进行详细描述。

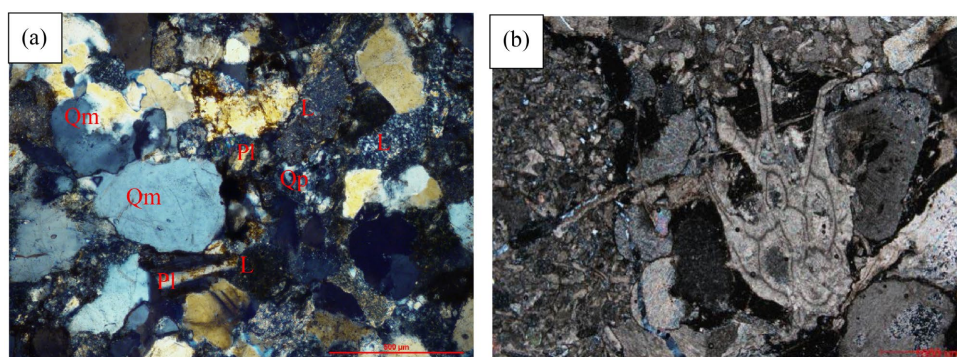


Figure 3. Photomicrographs of clastic rocks and bioclastic limestone from the Shuangputang Formation. (a) Medium- to coarse-grained feldspathic litharenite from Layer 20 (cross-polarized light); (b) Bioclastic limestone from Layer 33 (cross-polarized light)

图 3. 双堡塘组碎屑岩和生物碎屑灰岩显微照片。(a) 第 20 层中粗粒长石岩屑砂岩(正交偏光); (b) 第 33 层生屑灰岩(正交偏光)

(含砾)中粗粒长石岩屑砂岩(图 3(a)): 石英(35%)显示波状消光及磷灰石包裹体特征, 长石(15%)以钾长石与斜长石为主, 岩屑组分(45%~50%)包含硅质岩、安山岩及多种变质岩类型, 白云母、黑云母微量成分点缀。结构特征显示次圆-次棱角状分选, 颗粒支撑结构, 硅质-粘土质杂基胶结(2%~5%), 孔隙式胶结类型显著。

中厚层生屑灰岩(图 3(b)): 发育灰色中厚层生屑灰岩。岩石由生屑、填隙物组成。生屑由海百合类、苔藓虫类、珊瑚类、藻类等构成, 杂乱分布, 镜下粒度不等, 一般 0.5~8.0 mm, 被硅质不均匀交代, 组成矿物为方解石。填隙物由少量亮晶胶结物构成, 填隙状分布, 被硅质不均匀交代。

中薄层硅质岩: 由生屑、硅质、粘土质组成。生屑主要由海绵骨针、放射虫类等构成, 杂乱分布, 粒度一般 0.05~1.0 mm 不等, 均被硅质、少量铁质替代呈假象产出, 构成岩石之主体部分。硅质为隐晶状玉髓, 不均匀分布。粘土质由<0.005 mm 的粘土矿物构成, 与硅质混杂。

5. 讨论

5.1. 沉积相划分与储层分析

李渭等(2011)研究了额济纳旗及邻区石炭纪-二叠纪地层沉积特征, 指出双堡塘组的沉积环境属于滨浅海相, 但未进行详细的沉积相划分[44]。该剖面出露的碎屑岩的粒度概率累积曲线呈现典型“三段式”结构: 跳跃总体占比达 60%~85%, 牵引总体占 10%~25%, 悬浮组分约 5%, 指示沉积流体以牵引流作用为主导[26]。值得注意的是, 跳跃总体显示出良好的分选性及陡峭的坡度特征, 部分样品甚至呈现双跳跃分段现象, 这种独特的粒度分布模式与波浪作用下的冲刷-回流沉积动力过程高度吻合(图 4), 为其形成

于滨浅海环境提供了关键沉积学证据。

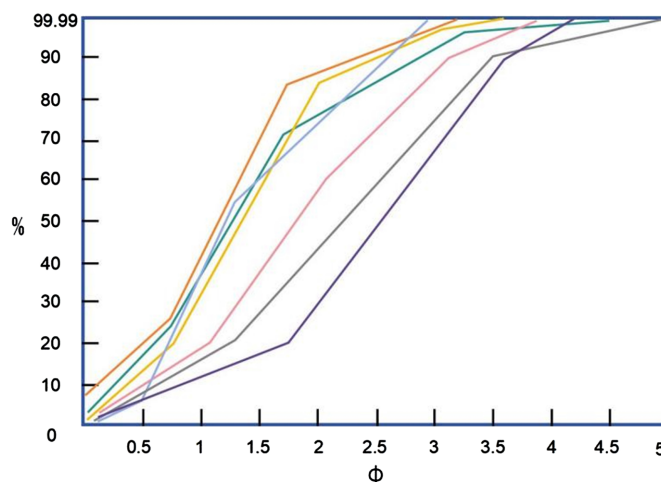


Figure 4. Cumulative grain-size curves of detrital grains from sandstones of the Shuangputang Formation (modified from [26])

图 4. 双堡塘组砂岩碎屑颗粒粒度累计曲线(改自[26])

综合前人研究成果, 对抗乌拉地区双堡塘组岩石组合的岩性特征、颜色、结构构造及沉积组合关系进行系统解析, 把该陆源碎屑岩-碳酸盐岩序列划分为两个沉积单元: 无障壁陆源碎屑海岸相和碳酸盐台地相。之后, 按地层垂向序列自下而上进行亚相或微相划分。

5.1.1. 无障壁陆源碎屑海岸相

无障壁陆源碎屑海岸相发育于开阔海岸带环境, 主要受潮汐和波浪作用控制, 其垂向沉积旋回呈现自下而上粒度逐渐变粗的特征。该沉积体系可进一步划分为过渡带亚相、临滨亚相和前滨亚相三个次级沉积单元。其中, 临滨亚相位于平均低潮线至正常浪基面之间, 沉积物以陆源碎屑为主, 分选性较好且粒度相对偏粗; 前滨亚相则分布于平均高潮线与平均低潮线区间, 受波浪冲洗作用影响显著, 发育低角度交错层理(纹层倾角通常小于 10°), 岩性以纯净的中粗粒石英砂岩为主[45]。根据岩性组合特点, 双堡塘组碎屑岩主要可分为, 过渡带亚相、临滨亚相和前滨亚相。

过渡带亚相(13~19 层)主要由灰褐色细粒长石岩屑砂岩与粉砂岩互层构成, 沉积物以细粒为主(平均粒径 $0.125\sim 0.25\text{ mm}$), 发育水平层理及生物扰动构造。该套沉积组合指示稳定的低能环境, 反映潮下带弱水动力条件下的悬浮沉积过程。

临滨亚相(3~8 层)垂向序列显示由灰褐色至灰紫色中细粒长石岩屑砂岩主导的沉积旋回。根据水动力条件差异可细分为: 上临滨微相(3~5 层), 发育于平均高潮线附近, 岩性组合为中粒长石岩屑砂岩与泥质粉砂岩韵律互层, 显示间歇性暴露特征; 下临滨微相(6~8 层), 位于平均低潮线区域, 泥质粉砂岩连续发育。20~26 层也为上临滨微相, 以灰红-灰绿色中细粒长石岩屑砂岩互层为特征, 含砾岩透镜体(最大砾径 5 cm)及典型冲刷充填构造, 证实该段受强烈波浪作用改造, 属滨海高能带沉积体系(图 5(a), 图 5(b))。

剖面 9~11 层发育前滨亚相沉积(图 6(a), 图 6(b)), 主体岩性为灰绿色与灰紫色互层的中粒长石岩屑砂岩, 局部夹粗粒长石岩屑砂岩透镜体, 偶见薄层状粉砂岩夹层。相较于上覆临滨亚相沉积, 本单元碎屑颗粒平均粒径增大, 是对滨岸带水动力条件增强的响应。岩相组合垂向序列呈现“粗-细-粗”韵律结构, 指示潮汐往复作用与波浪冲刷的共同影响。

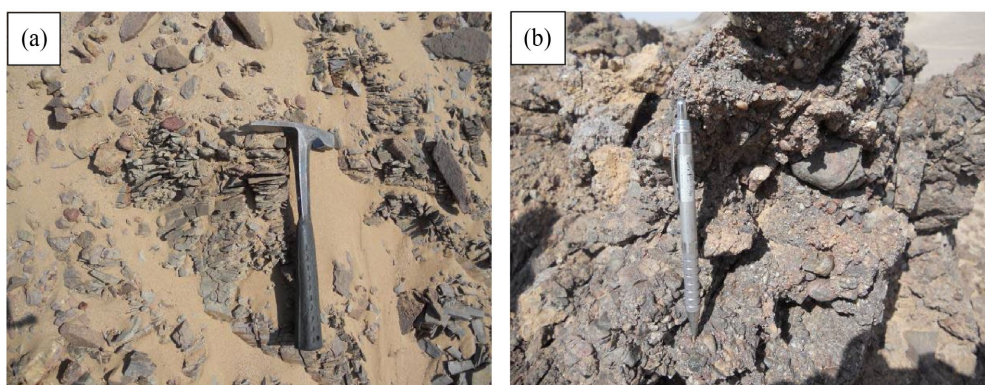


Figure 5. Field outcrop photographs of clastic rocks from the Shuangputang Formation. (a) Medium- to fine-grained feldspathic litharenite showing schistosity in Layer 24; (b) Grayish-red thick-bedded conglomerate lens in Layer 25

图 5. 双堡塘组碎屑岩野外露头照片。(a) 第 24 层中细粒长石岩屑砂岩片理化特征；(b) 第 25 层灰红色厚层砾岩透镜体

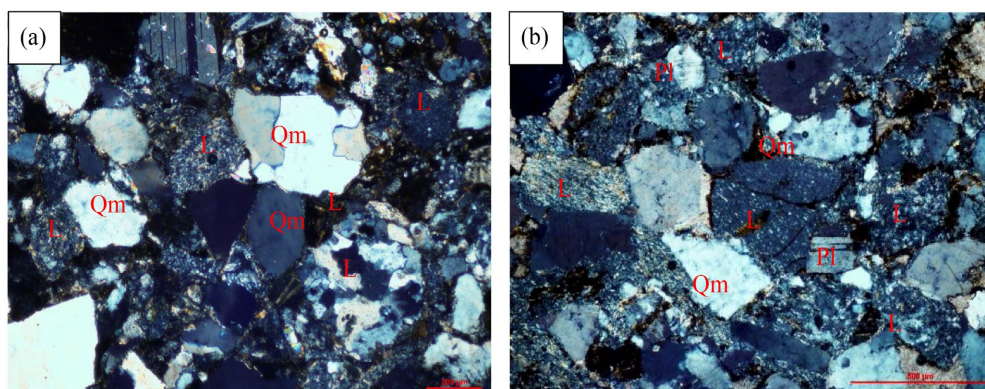


Figure 6. Photomicrographs of clastic rocks from the Shuangputang Formation. (a) Medium- to coarse-grained feldspathic litharenite from Layer 9 (cross-polarized light); (b) Medium-grained feldspathic litharenite from Layer 11 (cross-polarized light)

图 6. 双堡塘组碎屑岩显微照片。(a) 第 9 层中粗粒长石岩屑砂岩(正交偏光)；(b) 第 11 层中粒长石岩屑砂岩(正交偏光)

5.1.2. 浅海碳酸盐台地相

该剖面碳酸盐岩岩性组合较稳定，主要为中厚层生物碎屑灰岩、粉屑灰岩与硅质生物碎屑灰岩的韵律互层夹中薄层硅质岩透镜体。基于岩石薄片系统分析，结合 Wilson (1975)碳酸盐相模式[46]，该套碳酸盐岩序列可划分为台地边缘浅滩亚相、开阔台地亚相和局限台地亚相三个沉积单元。

台地边缘浅滩亚相(27 层)，以灰绿色薄层细粒长石石英砂岩为特征，石英含量占比达 65%以上，砂屑分选良好，成分成熟度较高(杂基含量 < 5%)，显示潮汐 - 波浪共同改造的高能浅滩环境(图 7(a))。

开阔台地亚相(31~35 层、42~43 层)的典型岩性组合为灰色中厚层生物碎屑灰岩与灰黑色薄层硅质岩互层、局部夹砂屑灰岩透镜体。生物碎屑灰岩中化石碎屑含量 20%~35%，以腕足类壳体碎片和海百合茎化石为主(图 7(b))，垂向呈现 0.5~1.2 m 级旋回结构，反映周期性海水涨落的浅海环境。42~43 层中，粉晶白云岩(图 8(a))与硅质岩薄层互层，进一步印证开放水体条件下的化学沉积特征。

局限台地亚相(30 层、36~39 层)，主要由灰黑色薄层硅质岩与灰色泥晶灰岩组成(图 8(b))，局部夹灰褐色生物碎屑灰岩及细砂岩透镜体。泥晶灰岩中可见微生物纹层结构，佐证了低能滞留环境的持续性。

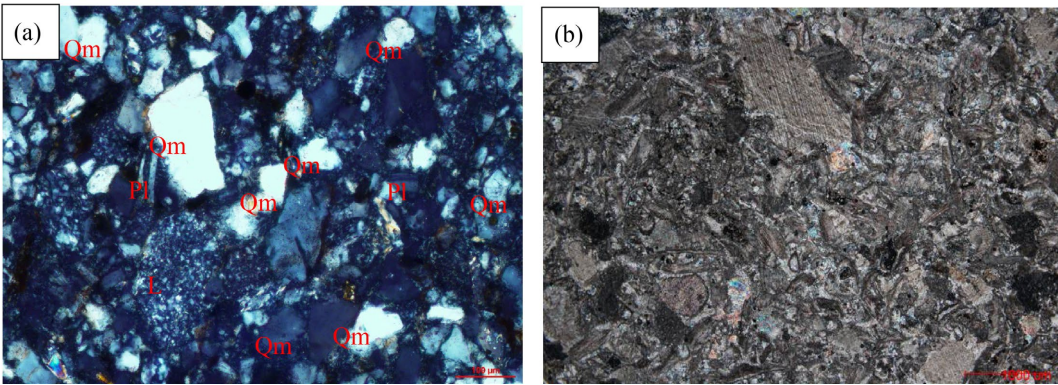


Figure 7. Photomicrographs of clastic and carbonate rocks from the Shuangputang Formation. (a) Silty fine sandstone from Layer 27 (plane-polarized light); (b) Bioclastic limestone from Layer 35 (cross-polarized light) (from [47])
图 7. 双堡塘组碎屑岩和碳酸盐岩显微照片。(a) 第 27 层粉砂质细砂岩(单偏光); (b) 第 35 层生物碎屑灰岩(正交偏光) (引用[47])

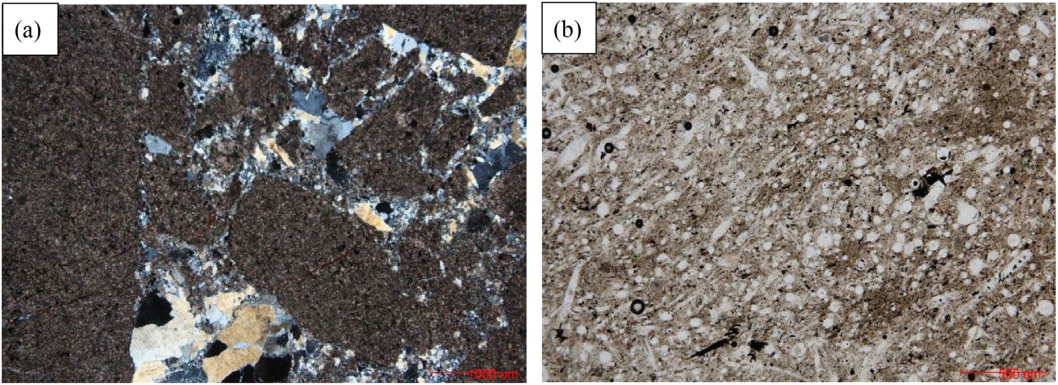


Figure 8. Photomicrographs of dolomiticrite and siliceous rock from the Shuangputang Formation. (a) Dolomiticrite from Layer 43 (cross-polarized light); (b) Siliceous rock from Layer 30 (plane-polarized light)
图 8. 双堡塘组粉晶灰岩和硅质岩显微照片。(a) 第 43 层粉晶白云岩(正交偏光); (b) 第 30 层硅质岩(单偏光)

5.1.3. 砂岩组分特征及物源指示

为进一步分析杭乌拉地区双堡塘组砂岩物源特征，在岩石薄片鉴定基础上，参考作者前期对同批样品开展的砂岩组分统计结果[47]，将典型样品投绘于 Dickinson 等(1983)提出的 Qp-Lv-Ls、Qt-F-L 及 Q-F-L 物源判别图[48] (图 9)。

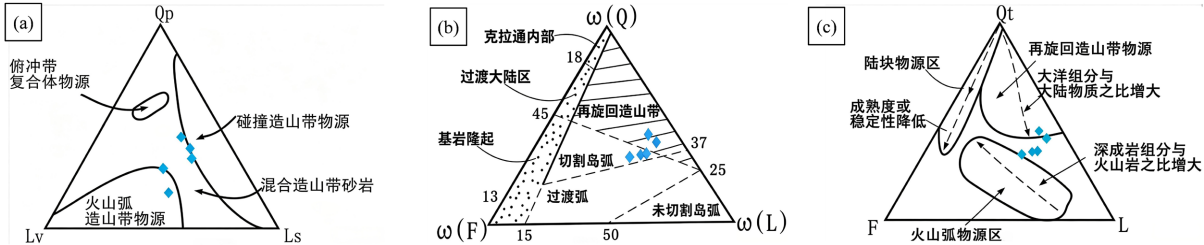


Figure 9. QFL provenance discrimination diagram for sandstones of the Shuangputang Formation in the Hangwula area (modified from Ref. [47])
图 9. 杭乌拉地区双堡塘组砂岩 QFL 物源判别图(修改自文献[47])

判别结果显示,样品主要落入火山弧造山带、切割岛弧及再旋回造山带附近,不同图解均反映物源具有活动大陆边缘特征。其中,Qp-Lv-Ls图解表明砂岩主要来源于火山弧与碰撞造山带共同影响的复合物源;Qt-F-L图解反映砂岩具有较高岩屑含量和中等石英成熟度,指示沉积物经历快速搬运和沉积;Q-F-L图解进一步表明物源具有明显的岛弧及再旋回造山带属性。

综合来看,QFL物源判别结果与本文岩石薄片观察所揭示的长石岩屑砂岩特征相一致,也与区域晚古生代活动大陆边缘岩浆活动背景相吻合,为杭乌拉地区早二叠世沉积于活动大陆边缘环境提供了岩石学依据。

5.1.4. 储层潜力分析

除沉积相特征外,砂岩组分及物源性质对储层发育也具有重要影响。杭乌拉地区双堡塘组砂岩以长石岩屑砂岩为主,整体表现为中等成熟度和较高岩屑含量,在滨岸高能环境及后期成岩作用共同影响下,形成了较好的储层发育基础。

研究区双堡塘组由无障碍陆源碎屑海岸与碳酸盐台地两大沉积体系构成,具备良好的储层发育条件。无障碍海岸体系的前滨、临滨亚相以中粗粒长石岩屑砂岩为主,颗粒分选较好、孔隙式胶结发育,波浪与潮汐的反复改造使原生粒间孔得以保存,是研究区最有利的碎屑岩储层发育相带。碳酸盐台地体系中,台地边缘浅滩亚相石英含量高、杂基少、水动力条件强,易形成高孔渗储层;开阔台地的生物碎屑灰岩、砂屑灰岩经溶蚀作用可形成次生孔隙,为重要的碳酸盐岩储层类型。局限台地与过渡带的细粒沉积则可作为有效盖层,与储层形成良好匹配。

杨建东等(2025)指出,碳酸盐台地内高能浅滩与开阔台地相带最利于优质储层发育,其相控储层规律与本区一致[49]。赵文智等(2015)认为,海相碎屑岩与碳酸盐岩互层序列具备规模储层形成的物质基础,滩体与台缘带是勘探重点[50]。卢进才等(2017)证实银额盆地二叠系发育优质烃源岩,与本区滨岸砂岩、台地灰岩储层构成有效生储组合[19]。综合来看,双堡塘组沉积体系具备形成岩性-构造复合油气藏的良好条件,前滨-临滨砂岩与台地边缘浅滩、开阔台地生屑灰岩是下一步油气勘探的优势相带。

5.2. 杭乌拉地区早二叠世构造背景

杭乌拉地区早二叠世构造背景是认识双堡塘组沉积演化及油气地质意义的重要基础。目前关于银额盆地北部二叠纪盆地性质仍存在不同认识,主要包括裂谷盆地[20][24][51]-[54]、弧后盆地[26][27]等不同构造解释。本文在前文沉积相分析、QFL物源判别的基础上,结合区域岩浆活动及构造演化资料,对不同盆地构造模型进行比较分析,以进一步探讨杭乌拉地区早二叠世的构造背景。

5.2.1. 不同盆地构造模型对比

关于杭乌拉地区(或银额盆地北部)二叠纪构造背景,目前尚存在不同认识。其中,较多学者认为其形成于板内裂谷环境。吴泰然和何国琦(1993)依据杭乌拉地区二叠纪巨厚复理石沉积特征,认为盆地持续加深与裂谷伸展作用密切相关[9];赫海洋(2013)提出晚石炭世罗苏期至早二叠世紫松期银额盆地进入陆内裂谷伸展阶段[53];卢进才等(2018)根据层序地层及沉积演化认为石炭纪-二叠纪构成统一的板内裂谷盆地系统[20];李润武等(2020)结合方山口组安山岩地球化学特征,认为其形成于后碰撞背景下的板内裂谷环境[55]。

然而,上述研究主要依据区域火山岩地球化学、年代学及构造演化开展分析,对杭乌拉地区双堡塘组沉积体系本身的沉积学约束相对有限。不同构造背景往往对应不同的沉积充填特征,因此,仅依据岩浆活动或区域构造演化尚不足以完全限定研究区盆地属性,还需结合沉积相组合、碎屑组分及物源特征进行综合判别。

Table 1. Comparison of sedimentary characteristics among different tectonic basin models in the Hangwula area during the Early Permian

表 1. 杭乌拉地区早二叠世不同盆地构造模型沉积特征对比

对比内容	裂谷盆地	弧前盆地	弧后盆地	杭乌拉地区
主控构造	板内伸展	俯冲前缘	弧后伸展	√
沉积体系	粗碎屑断陷	深水浊积	滨浅海 + 碳酸盐	√
火山物质	丰富	中等	丰富	√
QFL 物源	陆块/裂谷	弧源	火山弧 - 再旋回造山带	√
岩屑含量	中	中	高	√
综合判断	一般符合	不符合	最符合	√

从沉积学角度分析，裂谷盆地通常发育断陷控制下的粗碎屑沉积、快速侧向相变及较强的火山岩建造；弧前盆地则多形成于俯冲带前缘，以深海浊积岩及深水沉积体系为主；而弧后盆地则常表现为活动大陆边缘背景下滨浅海碎屑岩、碳酸盐台地及火山物质共同发育的沉积组合，并具有岩屑含量较高、物源成熟度较低等特点(表 1)。

5.2.2. 杭乌拉地区早二叠世构造背景分析

本文综合杭乌拉地区双堡塘组野外沉积特征、岩石薄片观察、QFL 物源判别结果以及区域岩浆活动和构造演化资料，认为杭乌拉地区早二叠世具有活动大陆边缘背景下弧后盆地沉积特征。

首先，沉积学证据显示，双堡塘组发育低成熟度陆源碎屑岩与生物碎屑灰岩互层的滨海 - 浅海碳酸盐台地沉积序列，局部夹硅质岩层。该套地层的系列沉积旋回指示高能滨浅海环境向周期性缺氧滞水环境的交替变化特征。其中，陆源碎屑岩的快速堆积模式与碳酸盐岩发育的间歇性化学沉降特征，符合俯冲带后缘伸展背景下差异沉降与古海水震荡的沉积响应。

其次，从区域构造演化背景上看，尽管部分学者认为研究区早古生代属被动大陆边缘[9]，但白山组 443~466 Ma (中晚奥陶世)碎屑锆石年龄[54]、晚奥陶世 - 志留纪侵入岩的发现[56]以及在杭乌拉以北地区也发现的晚泥盆世(383 Ma)花岗岩[57]揭示该时期已存在多期岩浆活动，暗示活动陆缘的早期启动。石炭纪开始的频繁火山活动标志着构造背景的根本转变，晚古生代的活动大陆边缘环境已成为共识[58]-[60]，而早二叠世双堡塘组的沉积组合恰好对应于该构造演化阶段的弧后伸展环境。该套岩石组合指示强烈的构造活动背景，片理化作用对原始沉积构造的强烈改造，与岩屑组分中高含量不稳定岩屑共同印证了活动陆缘沉积环境的特殊形成条件。

同时，研究区北侧的雅干构造带的演化历史揭示研究区二叠纪盆地属性提供了关键依据。雅干构造带作为中奥陶世启动的不成熟岛弧系统，中石炭世完成俯冲碰撞过程，其二叠纪火山 - 碎屑岩组合记录了碰撞后的持续隆升过程。雅干断裂带内出露的橄榄辉长岩体，与北山地区明水 - 小黄山蛇绿岩带构成连续构造单元[59]，揭示古亚洲洋南支洋盆中段的闭合过程。这一认识与 Liu 等(2018)提出的奥陶纪洋盆相吻合，其 400 Ma 的类似于 S 型花岗岩证据，推断该洋盆早泥盆世闭合，但二叠纪岩浆活动的持续性不仅反映了碰撞后的持续隆升，也表明该构造带构造活动具有多期性，尤其该构造带内所发现的 277~298 Ma 的过渡型和 I 型花岗岩类被认为形成于俯冲环境[61]。关于此类早二叠世花岗岩，郑荣国等(2013)认为与该洋盆在中石炭世开始向南俯冲有关[59]；Liu 等(2018)则认为由于古亚洲洋的进一步北向俯冲，导致洋壳脱水引发了地幔楔的部分熔融，源自地幔的岩浆的上涌和底侵作用使得前寒武纪基底岩石的部分熔融，幔源和壳源岩浆的混合作用在研究区形成了 298~277 Ma 的花岗岩[61]。因此，该构造带自石炭纪

火山活动频繁, 由被动陆缘转化为活动陆缘, 二叠纪复理石建造与玄武岩喷发事件揭示盆地持续沉降过程, 与古亚洲洋北向俯冲引发的地幔熔融过程密切相关。Deng 等(2023)对早二叠世(285~286 Ma)辉长岩和闪长岩的 Lu-Hf 同位素研究证实, 俯冲流体交代地幔橄榄岩的部分熔融作用构成了该时期岩浆活动的主控因素[62]。这些岩浆事件的空间耦合性暗示洋盆在早二叠世可能存在短暂扩张阶段, 从而为本区双堡塘组滨浅海沉积提供了构造背景。

研究区双堡塘组的碎屑岩-碳酸盐岩夹硅质岩组合指示强烈构造活动背景, 其低成熟度碎屑(短距离搬运、快速堆积特征)组分(450~284 Ma 锆石年龄)与雅干构造带的岩浆事件具有时空对应性[26]。也与史冀忠等(2013)所指出的, 研究区石炭纪小独山期-二叠纪紫松期(乌拉尔统的阿瑟尔阶和萨克马尔阶)物源来自西北部马鬃山-拐子湖中间隆起带和北部的结果一致[32]。因此, 推测随着雅干构造带在二叠纪持续隆升剥蚀, 杭乌拉地区的洋盆地接收到来自北部物源区的快速沉积物供给, 形成具有弧后盆地特征的连续沉积序列[26]。张超等(2024)在珠斯楞-杭乌拉构造带内发现 268.8 ± 3.1 Ma 辉长岩体, 则暗示该洋盆最终闭合时间为中二叠世[63]。

5.3. 研究局限性

本文主要依据杭乌拉地区双堡塘组野外实测剖面、岩相观察及薄片鉴定资料开展沉积学分析, 对沉积相类型、沉积环境及构造背景进行了讨论。由于目前尚缺乏银额盆地北部其他地区剖面、钻井及地震资料的系统对比, 本文建立的沉积模式和构造解释主要反映杭乌拉地区下二叠统双堡塘组的沉积响应, 其区域代表性仍需进一步验证。

此外, 不同构造单元受物源供给、古地貌条件及构造活动强度等因素影响, 双堡塘组沉积相组合及展布特征可能存在一定空间差异。因此, 本文关于弧后盆地沉积背景的认识, 主要适用于杭乌拉地区, 不宜直接推广至整个银额盆地。未来应结合更多区域露头、钻井、地震及沉积学资料开展综合对比研究, 进一步完善银额盆地北部早二叠世沉积体系及构造演化模式。

6. 结论

基于内蒙古杭乌拉地区下二叠统双堡塘组实测剖面的岩性组合、沉积构造、微观结构及古生物组合特征, 将研究区双堡塘组划分为无障壁陆源碎屑海岸沉积体系和碳酸盐台地沉积体系两大类型。其中, 无障壁陆源碎屑海岸体系自下而上可进一步划分为过渡带亚相、临滨亚相(上临滨、下临滨微相)及前滨亚相, 整体表现为波浪与潮汐共同作用的开阔滨浅海环境, 垂向上呈现由细到粗再到细的沉积旋回, 反映水动力条件由弱变强再减弱的演变过程; 碳酸盐台地体系可划分为台地边缘浅滩亚相、开阔台地亚相及局限台地亚相, 以生物碎屑灰岩、泥晶灰岩、硅质岩互层为特征, 记录了浅海高能浅滩-正常开阔海-低能局限滞留环境的交替演化。两类沉积体系在垂向上有序叠置, 共同构成研究区早二叠世稳定的滨浅海-碳酸盐台地沉积序列。

结合杭乌拉地区双堡塘组沉积特征、碎屑组分以及区域岩浆活动和构造演化资料, 认为杭乌拉地区早二叠世沉积于活动大陆边缘背景下的弧后盆地环境。该认识主要建立在杭乌拉地区剖面资料基础上, 可作为认识银额盆地北部早二叠世沉积演化的重要依据, 但尚不足以代表整个银额盆地的构造背景, 未来仍需结合区域多剖面及钻井资料进一步验证。双堡塘组低成分成熟度的陆源碎屑岩快速堆积、火山岩屑发育、片理化改造强烈, 指示活跃的构造背景; 古亚洲洋板块北向俯冲引发的弧后伸展作用, 为盆地持续沉降与滨浅海沉积充填提供了关键构造条件。

杭乌拉地区双堡塘组发育的暗色泥岩、硅质岩与碳酸盐岩组合, 显示出较好的生储组合潜力, 可为银额盆地北部上古生界油气勘探提供沉积学依据, 但其区域适用性仍需进一步验证。

基金项目

云南省教育厅基础科研项目“普洱市地质文化村建设研究”(2025J1046); 普洱学院高层次人才科研启动经费 - 云南景谷盆地孢粉记录的中新世植物多样性演化 - 杨立业。

参考文献

- [1] 张洪安, 李继东, 王学军, 等. 银额盆地形成演化及油气勘探展望[J]. 石油实验地质, 2020, 42(5): 780-789.
- [2] 史冀忠, 卢进才, 魏建设, 等. 银额盆地及邻区二叠系硅质岩岩石学、地球化学特征及沉积环境[J]. 地质通报, 2018, 37(1): 120-131.
- [3] Xiao, W.F., Windley, B.F., Han, C., *et al.* (2018) Late Paleozoic to Early Triassic Multiple Roll-Back and Oroclinal Bending of the Mongolia Collage in Central Asia. *Earth-Science Reviews*, **186**, 94-128.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.020>
- [4] 牛亚卓, 卢进才, 魏建设, 等. 甘蒙北山地区下石炭统绿条山组时代修正及其构造意义[J]. 地质论评, 2014, 60(3): 567-576.
- [5] 史兴俊, 张磊, 王涛, 等. 内蒙古阿拉善盟北部宗乃山中酸性侵入岩年代学、地球化学及构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2014, 33(6): 989-1007.
- [6] 卢进才, 牛亚卓, 魏仙样, 等. 北山红石山地区晚古生代火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(8): 2685-2694.
- [7] 耿元生, 周喜文. 阿拉善变质基底中的早二叠世岩浆热事件——来自同位素年代学的证据[J]. 岩石学报, 2012, 28(9): 2667-2685.
- [8] 王廷印, 张铭杰, 王金荣, 等. 恩格尔乌苏冲断带特征及大地构造意义[J]. 地质科学, 1998(4): 4-6+8-13.
- [9] 吴泰然, 何国琦. 内蒙古阿拉善地块北缘的构造单元划分及各单元的基本特征[J]. 地质学报, 1993(2): 97-108.
- [10] 刘护创, 王文慧, 陈治军, 等. 银额盆地哈日凹陷白垩系云质泥岩气藏特征与成藏条件[J]. 岩性油气藏, 2019, 31(2): 24-34.
- [11] 祁凯, 任战利, 崔军平, 等. 银额盆地苏红图坳陷西部中生界烃源岩热演化史恢复[J]. 地球科学, 2018, 43(6): 1957-1971.
- [12] 杨国臣, 焦大庆, 肖斌, 等. 查干凹陷下白垩统层序构型与沉积充填特征[J]. 新疆地质, 2013, 31(3): 223-230.
- [13] 卫平生, 谭开俊. 银额盆地白垩系烃源岩特征及影响因素[J]. 断块油气田, 2005(6): 8-10+89.
- [14] 崔海峰, 侯艳, 鲁如魁. 银额盆地现今结构及油气勘探启示[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(1): 83-93.
- [15] 白宇明, 薄海军, 杨伟龙, 等. 银额盆地额济纳旗伊很乌苏地区下白垩统巴音戈壁组的微体化石及沉积环境[J]. 地质通报, 2023, 42(10): 1666-1673.
- [16] 白晓寅, 贺永红, 韩小锋, 等. 银额盆地哈日凹陷灰质泥岩气藏识别技术[J]. 西北地质, 2020, 53(2): 270-279.
- [17] 王萍, 向连格, 姜海健, 等. 银根-额济纳旗盆地拐子湖凹陷白垩系油源对比分析[J]. 石油实验地质, 2019, 41(3): 427-434.
- [18] 陈治军, 任来义, 贺永红, 等. 银额盆地哈日凹陷银根组优质烃源岩地球化学特征及其形成环境[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(5): 1352-1364.
- [19] 卢进才, 张洪安, 牛亚卓, 等. 内蒙古西部银额盆地石炭系-二叠系油气地质条件与勘探发现[J]. 中国地质, 2017, 44(1): 13-32.
- [20] 卢进才, 宋博, 牛亚卓, 等. 银额盆地哈日凹陷 Y 井天然气产层时代厘定及其意义[J]. 地质通报, 2018, 37(1): 93-99.
- [21] 卢进才, 魏建设, 姜亨, 等. 银额盆地居延海坳陷钻井地层对比及对油气层时代的约束[J]. 中国地质, 2023, 50(5): 1311-1326.
- [22] 龙飞, 王劲松, 文一华, 等. 处理解释一体化技术在天草凹陷的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(z2): 251-255+260.
- [23] 卢进才, 牛绍武, 魏建设, 等. 银额盆地西部蒙额地 1 井二叠纪叶肢介的发现及其意义[J]. 地质通报, 2018, 37(1): 16-25.
- [24] 吝路军. 银-额盆地中部石炭-二叠纪火山岩地球化学特征与构造演化探讨[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安

- 大学, 2015.
- [25] 吴根耀. 中亚造山带南带晚古生代演化: 兼论中蒙交界区中-晚二叠世残留海盆的形成[J]. 古地理学报, 2014, 16(6): 907-925.
- [26] 尹海权. 内蒙古阿拉善地区北部古生代沉积及其大地构造演化特征[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- [27] 谢力, 尹海权, 周洪瑞, 等. 内蒙古阿拉善地区恩格尔乌苏缝合带二叠纪放射虫及其地质意义[J]. 地质通报, 2014, 33(5): 691-697.
- [28] Zhang, J., Cunningham, D., Qu, J., Zhang, B., Li, J., Zhao, H., *et al.* (2022) Poly-Phase Structural Evolution of the Northeastern Alxa Block, China: Constraining the Paleozoic-Recent History of the Southern Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, **105**, 25-50. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.12.007>
- [29] Chen, Y., Gan, L. and Wu, T. (2021) The Carboniferous-Permian Tectonic Setting for the Southernmost Central Asian Orogenic Belt: Constraint from Magmatic and Sedimentary Records in the Alxa Area, NW China. *Lithos*, **398**, Article 106350. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106350>
- [30] Zheng, R., Li, J., Xiao, W. and Wang, L. (2018) A New Ophiolitic Mélange Containing Boninitic Blocks in Alxa Region: Implications for Permian Subduction Events in Southern Caob. *Geoscience Frontiers*, **9**, 1355-1367. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.02.014>
- [31] 吴晓智, 何登发, 陈晓明, 等. 银根-额济纳旗盆地石油地质特征与资源潜力[J]. 地质科学, 2020, 55(2): 404-419.
- [32] 史冀忠, 陈高潮, 姜亨, 等. 内蒙古银额盆地及邻区石炭纪-二叠纪紫松期物源[J]. 地质通报, 2013, 32(11): 1777-1789.
- [33] 卢进才, 陈高潮, 魏仙样, 等. 内蒙古西部额济纳旗及邻区石炭系-二叠系沉积建造与生烃条件——石炭系-二叠系油气地质条件研究之一[J]. 地质通报, 2011, 30(6): 811-826.
- [34] 史冀忠, 陈高潮, 姜亨, 等. 内蒙古西部银额盆地及邻区二叠系隆林阶-冷坞阶层序地层格架[J]. 地质通报, 2012, 31(10): 1657-1668.
- [35] 崔海峰, 韩小锋, 白晓寅, 等. 银额盆地构造单元划分与油气勘探方向[J]. 天然气工业, 2024, 44(7): 89-96.
- [36] 韩伟, 卢进才, 魏建设, 等. 内蒙古银额盆地尚丹凹陷中生代构造活动的磷灰石裂变径迹约束[J]. 地质学报, 2015, 89(12): 2277-2285.
- [37] 宁夏回族自治区地质矿产局. 宁夏回族自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1990.
- [38] 李文国. 内蒙古自治区岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996.
- [39] 杨式溥. 内蒙古额济纳旗早二叠世遗迹化石[J]. 中国区域地质, 1987(1): 75-84.
- [40] Wells, N.A., Konowal, M. and Sundback, S.A. (2002) Quantitative Evaluation of Color Measurements: II. Analysis of Munsell Color Values from the Colton and Green River Formations (Eocene, Central Utah). *Sedimentary Geology*, **151**, 17-44. [https://doi.org/10.1016/s0037-0738\(01\)00205-6](https://doi.org/10.1016/s0037-0738(01)00205-6)
- [41] Tucker, M.E. and Jones, S.J. (2023) *Sedimentary Petrology*. Wiley.
- [42] Vandenberghe, J. (1992) Cryoturbations: A Sediment Structural Analysis. *Permafrost and Periglacial Processes*, **3**, 343-351. <https://doi.org/10.1002/ppp.3430030408>
- [43] Reading, H.G. (1996) *Sedimentary Environments: Processes, Facies, and Stratigraphy*. Blackwell Science.
- [44] 李渭, 卢进才, 陈高潮. 内蒙古西部额济纳旗及邻区石炭系-二叠系沉积环境[J]. 地质通报, 2011, 30(6): 983-992.
- [45] Reineck, H.E. and Singh, I.B. (2012) *Depositional Sedimentary Environments: With Reference to Terrigenous Classics*. Springer Science & Business Media.
- [46] Wilson, J.L. (1975) *Carbonate Facies in Geologic History*. Springer-Verlag.
- [47] 杨立业. 内蒙古阿拉善北部二叠系地质特征与构造演化[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- [48] Dickinson, W.R., Beard, L.S., Brakenridge, G.R., Erjavec, J.L., Ferguson, R.C., Inman, K.F., *et al.* (1983) Provenance of North American Phanerozoic Sandstones in Relation to Tectonic Setting. *Geological Society of America Bulletin*, **94**, 222-235. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1983\)94<222:ponaps>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1983)94<222:ponaps>2.0.co;2)
- [49] 杨建东, 彭秋, 王宪峰, 等. 川中地区下三叠统嘉陵江组五段沉积相及储层特征[J]. 四川地质学报, 2025, 45(2): 210-216.
- [50] 赵文智, 沈安江, 胡安平, 等. 塔里木、四川和鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩规模储层发育地质背景初探[J]. 岩石学报, 2015, 31(11): 3495-3502.
- [51] 卜建军, 牛志军, 吴俊, 等. 内蒙古西部额济纳旗及邻区上石炭统-下二叠统阿木山组的沉积特征和时代[J]. 地

- 质通报, 2012, 31(10): 1669-1683.
- [52] 韩伟, 刘溪, 李金超, 等. 内蒙古乌拉特后旗乌兰敖包地区石炭系-二叠系阿木山组沉积环境[J]. 地质通报, 2012, 31(10): 1684-1691.
- [53] 赫海洋. 银-额盆地上石炭统罗苏阶-下二叠统紫松阶岩相古地理研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2013.
- [54] 陈高潮, 魏仙样, 忤康林, 等. 内蒙古西部阿拉善右旗下石炭统白山组碎屑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年及意义[J]. 地质通报, 2011, 30(6): 955-961.
- [55] 李润武, 张鑫, 石强, 等. 阿拉善北部杭乌拉地区早二叠世火山岩地球化学、Nd-Hf 同位素特征及其构造意义[J]. 地质通报, 2020, 39(5): 647-658.
- [56] 郑荣国, 李锦轶, 肖文交, 等. 阿拉善地块北缘恩格尔乌苏地区发现志留纪侵入体[J]. 地质学报, 2016, 90(8): 1725-1736.
- [57] 张文. 北山-阿拉善北缘晚古生代花岗岩及其构造意义[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京大学, 2013.
- [58] 邱瑞照, 李廷栋, 肖庆辉. 阿拉善地块晚古生代构造演化新模式: 来自岩浆岩和沉积岩的记录[J]. 矿产勘查, 2024, 15(1): 1-12.
- [59] 郑荣国, 吴泰然, 张文, 等. 阿拉善地块北缘雅干花岗岩体地球化学、地质年代学及其对区域构造演化制约[J]. 岩石学报, 2013, 29(8): 2665-2675.
- [60] Feng, J., Xiao, W., Windley, B., Han, C., Wan, B., Zhang, J., *et al.* (2013) Field Geology, Geochronology and Geochemistry of Mafic-Ultramafic Rocks from Alxa, China: Implications for Late Permian Accretionary Tectonics in the Southern Altaids. *Journal of Asian Earth Sciences*, **78**, 114-142. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.01.020>
- [61] Liu, Q., Zhao, G., Han, Y., Li, X., Zhu, Y., Eizenhöfer, P.R., *et al.* (2018) Geochronology and Geochemistry of Paleozoic to Mesozoic Granitoids in Western Inner Mongolia, China: Implications for the Tectonic Evolution of the Southern Central Asian Orogenic Belt. *The Journal of Geology*, **126**, 451-471. <https://doi.org/10.1086/697690>
- [62] Deng, W.B., Shao, Z.G., Xu, H.J., Chen, X.H., Yi, J.J. and Zhang, S.J. (2023) Geochemistry, Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotope of the Early Permian Gabbro and High-Mg Diorites from the Zhusileng-Hangwula Belt in the Northern Alxa Area: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Geological Magazine*, **160**, 1417-1427. <https://doi.org/10.1017/s0016756823000444>
- [63] 张超, 李志丹, 张锋, 等. 内蒙古阿拉善左旗亚干铜镍钴矿辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素特征及其地壳伸展作用[J]. 中国地质, 2024, 51(4): 1368-1386.