

羌塘盆地侏罗纪黑色岩系古环境研究

毛伟丞*, 云亮, 杨佩琳

重庆科技大学地球科学系, 重庆

收稿日期: 2025年3月11日; 录用日期: 2025年4月10日; 发布日期: 2025年5月19日

摘要

本文以羌塘盆地侏罗纪黑色岩系为研究对象, 通过沉积学、元素地球化学及同位素分析, 结合区域构造演化背景, 系统探讨了该套岩系的古环境特征及其对有机质富集的控制作用。研究表明, 羌塘盆地侏罗纪经历了裂谷期、前陆盆地期和陆内改造期三个构造-沉积阶段, 黑色岩系主要发育于中侏罗世前陆盆地期的局限蒸发环境。地球化学指标(如 $V/Cr > 2$ 、 $U/Th > 1.25$ 、 $Pr/Ph < 1$)及沉积构造(纹层状灰岩、膏盐层)显示, 黑色岩系形成于缺氧-强还原条件下的咸水湖盆或深水台沟环境, 受古特提斯洋闭合导致的构造沉降与物源供给共同影响。有机质富集主要受控于古气候(干旱-半干旱)、古盐度(高盐度)及氧化还原条件(强还原)的协同作用, 其中布曲组与夏里组黑色页岩的TOC值最高(>2%), 干酪根类型以I-II型为主, 具备优质烃源岩潜力。研究建立的“构造控盆-环境耦合”沉积模式, 为深化特提斯构造域演化及油气资源评价提供了理论依据。

关键词

侏罗纪, 黑色岩系, 古环境, 羌塘盆地

Study on the Paleoenvironments of Jurassic Black Rock Series in the Qiangtang Basin

Weicheng Mao*, Liang Yun, Peilin Yang

Department of Earth Sciences, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Mar. 11th, 2025; accepted: Apr. 10th, 2025; published: May 19th, 2025

Abstract

This paper takes the Jurassic black rock series in the Qiangtang Basin as the research object. Through sedimentological, elemental geochemical and isotopic analyses, combined with the regional tectonic evolution background, the paleoenvironmental characteristics of this set of rock

*第一作者。

series and their control on the enrichment of organic matter are systematically discussed. The research shows that the Jurassic in the Qiangtang Basin experienced three tectonic-sedimentary stages: the rift stage, the foreland basin stage and the intracontinental reformation stage. The black rock series mainly developed in the restricted evaporative environment of the foreland basin stage in the Middle Jurassic. Geochemical indicators (such as $V/Cr > 2$, $U/Th > 1.25$, $Pr/Ph < 1$) and sedimentary structures (laminated limestone, evaporite layer) indicate that the black rock series formed in a saline lake basin or deep-water platform trench environment under anoxic-strongly reducing conditions, and was jointly affected by tectonic subsidence and provenance supply caused by the closure of the Paleo-Tethys Ocean. The enrichment of organic matter is mainly controlled by the synergistic effect of paleoclimate (arid-semiarid), paleosalinity (high salinity) and redox conditions (strongly reducing). Among them, the black shales of the Buqu Formation and the Xiali Formation have the highest TOC values ($>2\%$), and the kerogen is mainly of Type I-II, showing the potential of high-quality source rocks. The established “tectonic basin control-environmental coupling” sedimentary model provides a theoretical basis for deepening the understanding of the evolution of the Tethys tectonic domain and the evaluation of oil and gas resources.

Keywords

Jurassic, Black Rock Series, Paleoenvironment, Qiangtang Basin

Copyright © 2025 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

研究背景与意义

羌塘盆地位于特提斯域东部为一大型中生代海相沉积盆地。该盆地内发育多套烃源岩，并有多处古油藏和油气显示[1]。而该盆地的侏罗纪时期是羌塘盆地发育最完整、分布最广的地层，具有巨大的油气勘探潜力[2]。前人将侏罗系地层的主要岩性概括为“三砂夹两灰”，而这套黑色岩系的有机质含量最高，同时黑色岩系也是钼、铜、镍等多种贵金属和稀有金属富集层或矿源层[3]。其中，中侏罗统黑色岩系(如页岩、油页岩)因有机质含量高、分布广泛，成为研究古环境与油气生成的关键对象。黑色岩系是指一类主要由含有丰富有机质的沉积岩组成的地层，这些岩石通常呈现深色，主要是由于其中含有大量的有机质[4]，可以作为烃源岩生成油气，其中还富含稀有金属可以作为富矿的固体矿产层系。沉积环境多样，包括大洋盆地、大陆架、滨海沼泽、咸水及淡水湖泊等[5]，主要形成于缺氧环境。早期研究主要集中于地层划分与烃源岩评价，但对其形成的古气候、古盐度及氧化还原条件缺乏系统分析。元素地球化学作为重建古环境的有效手段，可通过主量、微量及稀土元素的分布特征，揭示沉积环境的氧化还原状态、物源区性质及气候条件，为油气勘探提供理论支撑。

2. 地质背景与地层特征

2.1. 区域构造格局

北羌塘坳陷与南羌塘坳陷以中央隆起带为界，重力场表现为北低南高，北羌塘基底界面最深(重力低值区)，成层性优于南羌塘。北羌塘下方广泛分布低密度火山岩体，可能与下地壳或上地幔岩浆活动相关[6]。中央隆起带作为核心构造单元，该带呈东西向展布，西段基底隆起幅度较大(基岩较浅)，东段基底逐

渐降低为潜伏低隆起。其形成与古特提斯洋关闭时的混杂岩带有关，并可能受龙木错–双湖缝合带控制[7]。但部分研究认为该带在双湖至唐古拉山一线并不连续，仅在局部存在高密度变形变质杂岩。北界为可可西里–金沙江缝合带，南界为班公湖–怒江缝合带，两者共同制约盆地演化。东界存在争议，有学者提出雪莲湖–格拉丹东一线为重力异常分界线。综上，羌塘盆地的构造格局以南北坳陷夹持中央隆起带为核心，基底与深大断裂控制其长期演化，分层滑脱系统塑造了复杂变形特征，是青藏高原特提斯构造域演化的关键记录。

2.2. 地层划分与岩性特征

羌塘盆地地层以中生界为主体，前寒武系至新生界均有出露，整体呈现“基底 + 盖层”双层结构。依据沉积旋回、不整合面及生物化石组合，划分为以下主要层序。

2.2.1. 三叠系

下三叠统：康鲁组(T_1kl)以碎屑岩为主，夹火山岩；硬水泉组(T_1y)为碳酸盐岩。

中三叠统：康南组(T_2k)以砂泥岩夹灰岩为特征。

上三叠统：肖茶卡组(T_3x)和那底岗日组(T_3nd)发育复理石沉积，含火山碎屑岩。

2.2.2. 侏罗系(主体沉积期)

下侏罗统：雀莫错组(J_1q)以砂岩、页岩为主，夹灰岩，反映滨浅海环境[8]。

中侏罗统：布曲组(J_2b)以厚层灰岩为标志，夹膏盐层(如东达桥组)；夏里组(J_2x)为砂泥岩夹灰岩。

上侏罗统：索瓦组(J_3s)以灰岩、泥灰岩为主，含白云岩储层。

白垩系：白龙冰河组(K_1b)以碎屑岩为主，局部夹碳酸盐岩，反映海陆过渡环境。

3. 羌塘盆地古环境判别指标体系

羌塘盆地的古环境判别综合运用了沉积学、地球化学、古生物学及同位素地球化学等多学科指标，通过多参数耦合分析揭示其复杂的古气候、古水深、氧化还原条件及构造背景演化特征。以下是主要判别指标及其应用。

3.1. 沉积学指标

3.1.1. 岩性组合序列

碳酸盐岩–碎屑岩旋回：侏罗系“三砂夹两灰”结构(雀莫错组砂岩 → 布曲组灰岩 → 夏里组砂泥岩 → 索瓦组灰岩 → 雪山组砂岩)，反映海平面升降与碎屑输入交替，指示构造活动与物源供给的周期性变化。主要发育膏盐层，中侏罗统的东达桥组膏岩、硬石膏层(厚度 > 146 米)指示局限蒸发环境，是干旱气候与封闭盆地的直接证据。上三叠统那底岗日组的火山碎屑岩反映周缘造山带活动与构造挤压背景[9]。

3.1.2. 沉积构造与相标志

布曲组厚层生物礁灰岩(含双壳类、菊石化石)指示开阔台地高能环境，藻灰岩反映透光带浅水条件[10]。深缓坡相中发育的纹层状灰岩，反映低能静水环境，常伴随有机质富集。雀莫错组砂岩中的大型板状交错层理基底冲刷构造，标志滨浅海或三角洲前缘动力环境。

3.2. 地球化学指标

3.2.1. 主量元素比值

Sr/Ba 比值：高 $\text{Sr/Ba} (> 1)$ 指示咸水环境，低比值(<1)代表淡水输入，用于区分海陆过渡相与陆相[11]。

Fe/Mn 比值：高 Fe/Mn (>40)反映还原条件，常见于潟湖或深水台沟相[12]。

3.2.2. 微量元素组合

V/Cr 与 U/Th 比值：V/Cr > 2 且 U/Th > 1.25 指示缺氧环境，如土门格拉组黑色页岩；低值反映氧化条件[12]。Mo-U 协变关系：Mo 富集(>10 ppm)与 U/Mo > 1，指示强滞留盆地环境，如安多组深水台沟相[8]。

3.2.3. 稀土元素(REE)模式

轻稀土富集与 Eu 异常：布曲组碳酸盐岩的 LREE 富集及负 Eu 异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* < 0.8$)指示陆源输入主导，正 Eu 异常则可能与热液活动相关。Ce 异常(Ce/Ce^*)：Ce 负异常($\text{Ce}/\text{Ce}^* < 0.9$)反映氧化水体，常见于浅海台地；无异常或正异常指示缺氧环境。

3.2.4. 有机地球化学参数

TOC 与干酪根类型：TOC > 2% 的泥岩(如土门格拉组)结合 I-II 型干酪根，指示高生产力与还原环境，是优质烃源岩标志。Pr/Ph 比值：低 Pr/Ph (<1) 反映强还原条件，高比值(>3) 指示氧化环境，用于判别潟湖与开阔台地。

3.3. 古生物学与遗迹化石指标

3.3.1. 古生物化石组合

菊石与双壳类：布曲组中直径达 15 cm 的菊石化石及双壳类富集，指示正常盐度开阔海域环境。珊瑚与海绵礁：石炭 - 二叠系生物礁中珊瑚骨架岩发育，反映温暖浅海台地环境，与古特提斯洋扩张相关。冷 - 暖水混生生物：早二叠世晚期浅海混积陆棚相中冷、暖水生物交替出现，标志古纬度迁移或气候波动[13]。

3.3.2. 遗迹化石与生物扰动

古网迹(Palaeodictyon)：上三叠统巴贡组中的古网迹遗迹化石，指示半深海 - 深海低能环境。生物扰动指数(BI)：低 BI (0~1) 反映高沉积速率或贫氧条件，高 BI (4~5) 指示稳定浅海环境。

3.4. 同位素与磁学指标

3.4.1. 碳氧同位素($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$)

$\delta^{13}\text{C}$ 正偏移：布曲组灰岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值(+2‰至+3‰)与全球中生代碳循环事件对比，可标定海平面变化及生产力波动。 $\delta^{18}\text{O}$ 古温度计： $\delta^{18}\text{O}$ 值偏低(-5‰至-3‰)反映温暖气候，如晚三叠世热带亚热带环境[13]。

3.4.2. 硫锶同位素($\delta^{34}\text{S}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)

膏盐层 $\delta^{34}\text{S}$ 值：中侏罗统膏岩 $\delta^{34}\text{S} > 20\text{‰}$ ，与同期海水硫酸盐同位素对比，可约束蒸发盆地的封闭程度。此外，碳酸盐岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.707~0.708) 反映陆源输入与海源混合，高比值(>0.710) 指示造山带剥蚀[11]。

3.4.3. 岩石磁学参数

磁性矿物组合：雁石坪群磁铁矿与赤铁矿比例变化，响应侏罗纪潮湿 → 半干旱气候旋回，如磁铁矿富集段对应湿润期[14]。磁化率(x)：高 x 值砂泥岩层(如雀莫错组)反映强化学风化，与温暖潮湿气候相关[10]。

4. 羌塘盆地沉积模式构建

羌塘盆地的沉积模式需综合构造演化、古地理格局、物源供给及海平面变化等多因素，以“构造控

盆、源-汇耦合、层序响应”为主线，构建多尺度时空演化模型。以下从构造阶段划分、沉积体系配置、模式验证与应用三方面系统阐述。

4.1. 构造阶段与沉积响应框架

羌塘盆地沉积模式可划分为裂谷期、前陆盆地期、陆内改造期三大阶段，各阶段沉积特征与构造背景紧密耦合(表 1)。

Table 1. Sedimentary characteristics and tectonic settings of different stages in the Qiangtang basin
表 1. 羌塘盆地各阶段沉积特征与构造背景

构造阶段	时间范围	构造背景	主导沉积体系	典型层位
裂谷期	晚石炭世 - 中三叠世	古特提斯洋裂解，伸展断陷	火山 - 碎屑混积台地、生物礁碳酸盐岩	平沙沟组、那底岗日组
前陆盆地期	晚三叠世 - 早白垩世	特提斯洋闭合，周缘造山带加载	复理石楔、碳酸盐岩台地、膏盐蒸发岩	肖茶卡组、布曲组、东达桥组
陆内改造期	晚白垩世 - 新生代	高原隆升，挤压走滑	冲积扇 - 河流相、山麓磨拉石	白龙冰河组、古近系砾岩

4.2. 多阶段沉积体系时空配置

4.2.1. 裂谷期(晚石炭世 - 中三叠世)

古特提斯洋北向俯冲引发弧后伸展，形成半地堑式断陷盆地。沉积体系为火山 - 碎屑混积台地，那底岗日组火山碎屑岩与灰岩互层，火山活动中心发育凝灰岩夹安山岩($\text{SiO}_2 > 55\%$)。以生物礁碳酸盐岩发育为主，石炭系 - 二叠系台地边缘发育珊瑚 - 海绵礁体(厚度 $> 200 \text{ m}$)，礁核相含大量生物粘结结构。下三叠统康鲁组硅质页岩(含放射虫化石)，反映裂谷早期半深海环境。模式特征表现为北羌塘受控于金沙江缝合带，火山活动强烈；南羌塘以碳酸盐岩台地为主。同沉积断裂(如双湖断裂)控制次级凹陷与凸起，沉积厚度差异达 3 倍以上。

4.2.2. 前陆盆地期(晚三叠世 - 早白垩世)

特提斯洋闭合引发周缘造山带隆升(如唐古拉山)，盆地转为挤压挠曲沉降。沉积体系：复理石楔：上三叠统肖茶卡组发育递变层理砂岩与暗色泥岩互层(Bouma 序列 AB 段)，物源来自北侧造山带(QFL 图解显示为旋回造山带特征)。中侏罗统布曲组厚层灰岩($> 1000 \text{ m}$)发育生物碎屑滩、礁相及缓坡相， $\delta^{13}\text{C}$ 正偏移(+2‰至+3‰)标志高生产力期。东达桥组膏岩层(NaCl 含量 $> 90\%$)与白云岩共生， $\text{Sr/Ba} > 5$ ，反映局限蒸发环境。索瓦组合地边缘斜坡相发育滑塌角砾岩(砾石直径达 1 m)，指示构造活动引发的重力流事件。模式特征表现为造山带剥蚀速率($\sim 0.5 \text{ mm/yr}$)与盆地沉降速率($\sim 0.3 \text{ mm/yr}$)匹配，形成“厚层碎屑岩 - 碳酸盐岩互层”结构。海侵体系域(TST)发育生物礁储层，高位体系域(HST)形成膏盐盖层，构成优质储盖组合。

4.2.3. 陆内改造期(晚白垩世 - 新生代)

印度 - 欧亚板块碰撞引发高原隆升($> 4000 \text{ m}$)，盆地转为挤压走滑。以冲积扇 - 河流相为主，白龙冰河组红色砾岩(砾石磨圆度差，成分以灰岩为主)，反映干旱气候下的快速堆积。古近系砾岩(厚度 $> 500 \text{ m}$)发育叠瓦状构造，碎屑锆石年龄峰值(250~200 Ma)指示物源来自南侧班公湖 - 怒江缝合带。形成早期伸展断层逆冲活化，中央隆起带抬升剥蚀(剥蚀量 $> 2000 \text{ m}$)，导致南北羌塘地层差异剥露的沉积模式。

$\delta^{18}\text{O}$ 值升高(-2‰至0‰)反映高原隆升导致的温度下降与干旱化。

4.3. 沉积模式验证与应用

4.3.1. 典型剖面验证

雁石坪剖面(北羌塘): 层序结构为侏罗系布曲组灰岩(TST) → 夏里组砂泥岩(HST) → 索瓦组灰岩(TST), 构成完整三级层序(持续时间~2 Myr)。根据地球化学证据, 布曲组灰岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7075$, 与全球海水曲线一致, 验证海相成因。双湖剖面(南羌塘): 在构造响应上, 上三叠统复理石沉积中发育同沉积褶皱(波长~100 m), 反映前陆盆地早期挤压应力。

4.3.2. 油气勘探指导

白云岩储层的布曲组细晶白云岩孔隙度 8%~12%, 受膏盐层脱水驱动形成, 分布受同沉积断裂控制(如双湖断裂东段)。裂缝型储层的索瓦组灰岩构造裂缝密度 > 5 条/m, 与喜马拉雅期走滑断裂活动相关。膏盐封盖, 东达桥组膏岩突破压力 > 15 MPa, 封闭性优于泥岩盖层(<5 MPa)。上三叠统泥岩滑脱面导致上覆地层破碎, 局部破坏圈闭完整性。例如, 羌塘捷来地区古油藏白云岩具有明显的油气显示, 属于南羌塘古油藏带的重要组成部分, 白云岩具有低孔中渗至中孔中渗的特点, 为裂缝型储层, 属于I-II类型, 储集性能良好, 与已发现的南羌塘西部隆鄂尼和东部达卓玛优质白云岩相似, 为盆地良好的储集层[15]。

4.3.3. 模式局限性

时空分辨率不足: 现有年代框架(生物地层 + 锆石 U-Pb)精度约±2 Myr, 难以刻画高频层序(四级以下)。深部过程耦合, 岩浆底侵(如北羌塘低密度体)对沉积热体制的影响尚未量化。

5. 结论

羌塘盆地是揭示特提斯构造域演化的“天然实验室”, 其构造 - 沉积 - 环境耦合过程为青藏高原隆升机制与油气资源评价提供了关键约束。羌塘盆地作为青藏高原核心构造单元与特提斯域演化的重要记录者, 其地质特征与动力学过程可概括为“构造控盆、沉积响应、环境耦合”的协同演化体系。未来需聚焦深部 - 浅部联动、多指标定量集成与勘探技术研发, 以破解陆内盆地动力学与复杂储层预测的难题。

参考文献

- [1] 杨易卓, 黄志龙, 赵珍, 等. 羌塘盆地毕洛错地区古油藏地球化学特征与油源对比[J]. 地球科学, 2022, 47(5): 1834-1848.
- [2] Fu, X., Wang, J., Tan, F., Chen, M., Li, Z., Zeng, Y., et al. (2016) New Insights about Petroleum Geology and Exploration of Qiangtang Basin, Northern Tibet, China: A Model for Low-Degree Exploration. *Marine and Petroleum Geology*, 77, 323-340. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.06.015>
- [3] Fan, D.L., Yang, R.Y. and Huang, Z.X. (1984) The Lower Cambrian Black Shales Series and Iridium Anomaly in South China. 215-224. <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&id=9680233>
- [4] 邓宏文, 钱凯. 深湖相泥岩的成因类型和组合演化[J]. 沉积学报, 1990(3): 1-21.
- [5] 王剑, 付修根. 论羌塘盆地沉积演化[J]. 中国地质, 2018, 45(2): 237-259.
- [6] 熊盛青, 周道卿, 曹宝宝, 等. 羌塘盆地中央隆起带的重磁场证据及其构造意义[J]. 地球物理学报, 2020, 63(9): 3491-3504.
- [7] 葛天助, 安仰生, 宋利强, 等. 基于红外光谱技术的区域矿物格架及地层划分研究-以北羌塘盆地玛曲地区侏罗统雀莫错组为例[J]. 地质论评, 2023, 69(5): 1939-1951.
- [8] 刘若涵, 何碧竹, 郑孟林, 等. 羌塘盆地东部晚三叠世-侏罗纪构造-沉积演化[J]. 岩石学报, 2019, 35(6): 1857-1874.
- [9] 马伯永, 王训练, 王根厚, 等. 青藏高原羌塘盆地东缘贡日地区中侏罗统布曲组碳酸盐岩微相与沉积环境[J]. 地质通报, 2009, 28(5): 609-617.

-
- [10] 徐琳, 肖进, 刘大明, 胡林, 罗绍强, 唐华, 赵宇. 南羌塘盆地江鱼玛洛地区中侏罗统雀莫错组砂岩地球化学及源区环境. 地质与资源, 2022, 31(6): 738-747, 797.
 - [11] 万友利, 王剑, 万方, 付修根, 王忠伟, 沈利军. 羌塘盆地南部古油藏带布曲组碳酸盐岩稀土元素特征及意义[J]. 石油实验地质, 2017, 39(5): 655-665.
 - [12] 刘栩, 刘中戎, 庄新兵, 范志伟, 马泽良, 彭金宁, 李风勋, 李吉鹏, 李兴强. 羌塘盆地东部三叠系阿堵拉组烃源岩古沉积环境的地球化学证据[J]. 石油实验地质, 2024, 46(3): 601-613.
 - [13] 蔚远江, 杨晓萍, 雷振宇, 张洪, 陆万雨. 羌塘盆地查郎拉地区中新生代古气候演化初探[J]. 地球学报, 2002, 23(1): 55-62.
 - [14] 吴松, 宋春晖, 颜茂都, 等. 北羌塘盆地雁石坪地区中-上侏罗统岩石磁学特征与沉积环境[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(2): 571-580.
 - [15] 孙道晓, 梁鹰, 韩中鹏, 等. 羌塘盆地捷来白云岩古油藏特征及油气地质意义[J]. 岩石学报, 2025, 41(3): 1084-1100.