

北羌塘坳陷夏里组碎屑岩地球化学特征及其 对风化、物源与构造背景的启示*

戚 俊^{1,2} 王忠伟^{1,2} 王 剑^{1,2} 隋博雨^{1,2} 李 磊^{1,2}

1 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川成都 610500

2 西南石油大学羌塘盆地研究院, 四川成都 610500

摘 要 北羌塘坳陷中侏罗世夏里组沉积期发生了一次大规模海退, 发育大量含膏碎屑岩。本研究以北羌塘坳陷胜利河西剖面 and 羌科 1 井夏里组碎屑岩岩石学及元素地球化学资料为基础, 分析其物源区化学风化强度、沉积物源属性及大地构造背景, 明确其对侏罗纪盆地演化及成盐响应的意义。结果表明: (1) 研究区夏里组碎屑岩化学风化指数 (CIA) 受颗粒大小与分选性影响较大, 且基本不受沉积旋回的影响, 故泥页岩样品的 CIA 值能够较真实地反映物源区的化学风化强度。羌科 1 井夏里组泥页岩 CIA 值波动较大 (60~77), 基本不受钾交代作用影响, 表明羌科 1 井物源区总体上经历了中等—弱的化学风化作用。胜利河西剖面夏里组泥页岩样品的 CIA 值受钾交代作用影响较大, 经钾校正后的泥页岩样品 CIA 值 (CIA_{corr}) 为 80~85, 表明胜利河西剖面物源区经历了强烈的化学风化作用。(2) 依据 La/Th vs. Hf、Co/Th vs. La/Sc、La/Yb vs. Σ REE 及 A-CN-K 等判别图解, 结合显著的 Eu 负异常, 推测夏里组物源主要来自长英质岩石。其中, 北羌塘坳陷西部胜利河和中部羌科 1 井地区夏里组碎屑岩主体形成于碰撞型构造背景, 而东部沱沱河地区夏里组主体形成于岛弧构造背景, 这一结论与北羌塘坳陷侏罗纪中期的构造体制一致, 即侏罗纪中期北羌塘中、西部为陆内弱挤压前陆盆地, 而东部可能为班公湖—怒江新特提斯洋俯冲消减诱发的弧后前陆盆地。(3) 侏罗纪早、中期北羌塘地区多期次海侵—海退、相对干旱的古气候条件及局限的古地理背景为夏里组膏盐岩形成奠定了有利条件。

关键词 化学风化 物源 碰撞型背景 夏里组 羌塘盆地

第一作者简介 戚俊, 男, 2001 年生, 西南石油大学硕士研究生, 主要从事沉积学研究工作。E-mail: 502205919@qq.com。

通讯作者简介 王忠伟, 男, 1990 年生, 西南石油大学副教授, 主要从事中生代羌塘盆地演化与油气资源评价研究。E-mail: wzwdg@sina.com。

中图分类号: P594 文献标志码: A

Geochemical characteristics of clastic rocks from the Xiali Formation in North Qiangtang Depression and their implications for weathering, provenance and tectonic setting

QI Jun^{1,2} WANG Zhongwei^{1,2} WANG Jian^{1,2} SUI Boyu^{1,2} LI Lei^{1,2}

1 School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2 Qiangtang Institute of Sedimentary Basin, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

* 国家自然科学基金项目 (编号: 42241202, 42372129) 和四川省自然科学基金项目 (编号: 2024NSFSC0833) 联合资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42241202, 42372129) and Natural Science Foundation of Sichuan Province (No. 2024NSFSC0833)]

收稿日期: 2024-12-20 改回日期: 2025-03-10

Abstract A large-scale marine regression occurred during the depositional period of the Middle Jurassic Xiali Formation in the North Qiangtang Depression, accompanied by the widespread deposition of gypsum-bearing clastic sediments. Based on integrated petrological characteristics and elemental geochemical analyses of clastic rocks from the Xiali Formation in the Shenglihexi section and Well QK-1, we systematically analyzed the intensity of chemical weathering, provenance characteristics, and tectonic setting of these sediments, which is critical for understanding the evolutionary history and evaporite response of the Jurassic basin system. The results indicate that the Chemical Index of Alteration (CIA) values of these clastic rocks are significantly influenced by grain size and sediment sorting, but minimally affected by sedimentary recycling; thus, the CIA values of mudstone samples reflect the intensity of chemical weathering in the source region. Mudstones from the Xiali Formation in Well QK-1 exhibit considerable variation in CIA values (60–77), with negligible influence from potassium metasomatism, indicating that the source area underwent generally moderate to weak chemical weathering. In contrast, mudstones from the Shenglihexi section show significant effects of potassium metasomatism; after correction for this influence (CIA_{corr}), their values range from 80 to 85, suggesting intense chemical weathering in the corresponding source region. Discriminant diagrams based on La/Th vs. Hf, Co/Th vs. La/Sc, La/Yb vs. Σ REE, and A-CN-K plots, along with pronounced negative Eu anomalies, collectively indicate a predominantly felsic rock provenance for these clastic deposits. Clastic sediments from the western and central segments of the North Qiangtang Depression were deposited in a continental collision setting, whereas those from the eastern segment were formed in an arc-related tectonic environment. This interpretation aligns well with the established tectonic framework of the North Qiangtang Depression during the Middle Jurassic. During this period, the central and western regions functioned as a weakly magmatic intracontinental foreland basin, while the eastern region likely developed as a back-arc foreland basin, induced by southward subduction of the Bangonghu-Nujiang Tethys Ocean. Multiple transgressive-regressive cycles, combined with a relatively arid palaeoclimate and restricted paleogeographic conditions in the North Qiangtang Depression during the Early to Middle Jurassic, may have created favorable conditions for the formation of extensive gypsum-rich evaporites within the Xiali Formation.

Key words chemical weathering, provenance, collision setting, Xiali Formation, Qiangtang Basin

About the first author QI Jun, born in 2001, masteral degree candidate, is mainly engaged in research on sedimentology. E-mail: 502205919@qq.com.

About the corresponding author WANG Zhongwei, born in 1990, is an associate professor in Southwest Petroleum University. He is engaged in researches on the evolution of the Mesozoic Qiangtang Basin and the evaluation of oil and gas resources. E-mail: wzwcgdg@sina.com.

1 概述

羌塘盆地位于青藏高原腹部, 中生代隶属于含油气资源最为丰富的特提斯构造域东段 (王成善等, 2001)。该盆地不仅是青藏高原地区油气资源潜力最大的沉积盆地 (谭富文等, 2002; 王剑等, 2009, 2022; 吴珍汉等, 2014), 同时也是极具成盐远景的蒸发岩盆地 (郑绵平等, 2006; Fang *et al.*, 2016)。然而, 侏罗纪羌塘盆地的形成演化过程及其构造属性目前还存在很大争议。例如, 王

剑和付修根 (2018) 基于沉积相及岩相古地理分析, 认为羌塘盆地经历了早—中侏罗世巴柔期被动陆缘裂陷→中侏罗世巴通期被动陆缘拗陷→中侏罗世卡洛期被动大陆向活动大陆边缘转化→晚侏罗世提塘期—早白垩世贝里阿斯期盆地萎缩消亡的演化过程; 沈安江等 (2024) 认为, 早、中侏罗世北羌塘受龙木错—双湖和可可西里—金沙江造山带挤压影响发育陆内弱挤压前陆盆地, 晚侏罗世—早白垩世受班公湖—怒江特提斯洋关闭、碰撞影响发育陆

内强挤压前陆盆地。以上争议导致对侏罗纪早、中期规模性膏盐岩的发育产生了不同的认识。中侏罗世卡洛期夏里组沉积期,盆地沉积中心迁移并发生了一次大规模的快速海退,以泥灰岩、粉砂质泥岩、砂岩、粉砂岩夹石膏沉积为特征,可能记录了侏罗纪羌塘盆地演化的关键信息(王剑和付修根, 2018; Gao *et al.*, 2020)。

已有研究证实,碎屑岩的化学成分与源区的化学风化程度及构造背景密切相关(McLennan *et al.*, 1993),被广泛用于判别沉积物物源属性、大地构造背景及源区的化学风化过程(Yang *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2018; 吴晨晓等, 2022; 秦何星等, 2024)。Bhatia (1983) 在研究澳大利亚东部杂砂岩化学成分与源区构造背景关系时发现,在被动大陆边缘→活动大陆边缘→大洋岛弧→大陆岛弧背景下, $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}} + \text{MgO}$ 、 TiO_2 含量和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 值依次增大,而 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$ 值依次减小,由此建立了 $(\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}} + \text{MgO})$ vs. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 、 $(\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}} + \text{MgO})$ vs. TiO_2 和 $(\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}} + \text{MgO})$ vs. $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$ 等源区构造背景判别图解。另外, Bhatia 和 Crook (1986) 在对澳大利亚东部 5 个已知物源区构造背景的杂砂岩及泥岩的地球化学特征进行研究时提出了 La-Th-Sc、Th-Co-Zr/10、Th-Sc-Zr/10 三角图解和 La/Sc-Ti/Zr 双变量图解。近年来研究发现,上述图解在源区构造背景判别中的可靠性较低(准确率低于 30%),目前被认为需谨慎使用(Verma and Armstrong-Altrin, 2013)。Verma 和 Armstrong-Altrin (2013) 利用统计学原理,依据新生代沉积物中的主要氧化物提出了 2 个多维判别图,其可以有效地区分碰撞、裂谷和岛弧构造背景,很大程度上提高了沉积岩构造背景判别的准确率(Moradi *et al.*, 2016; Deng *et al.*, 2019)。

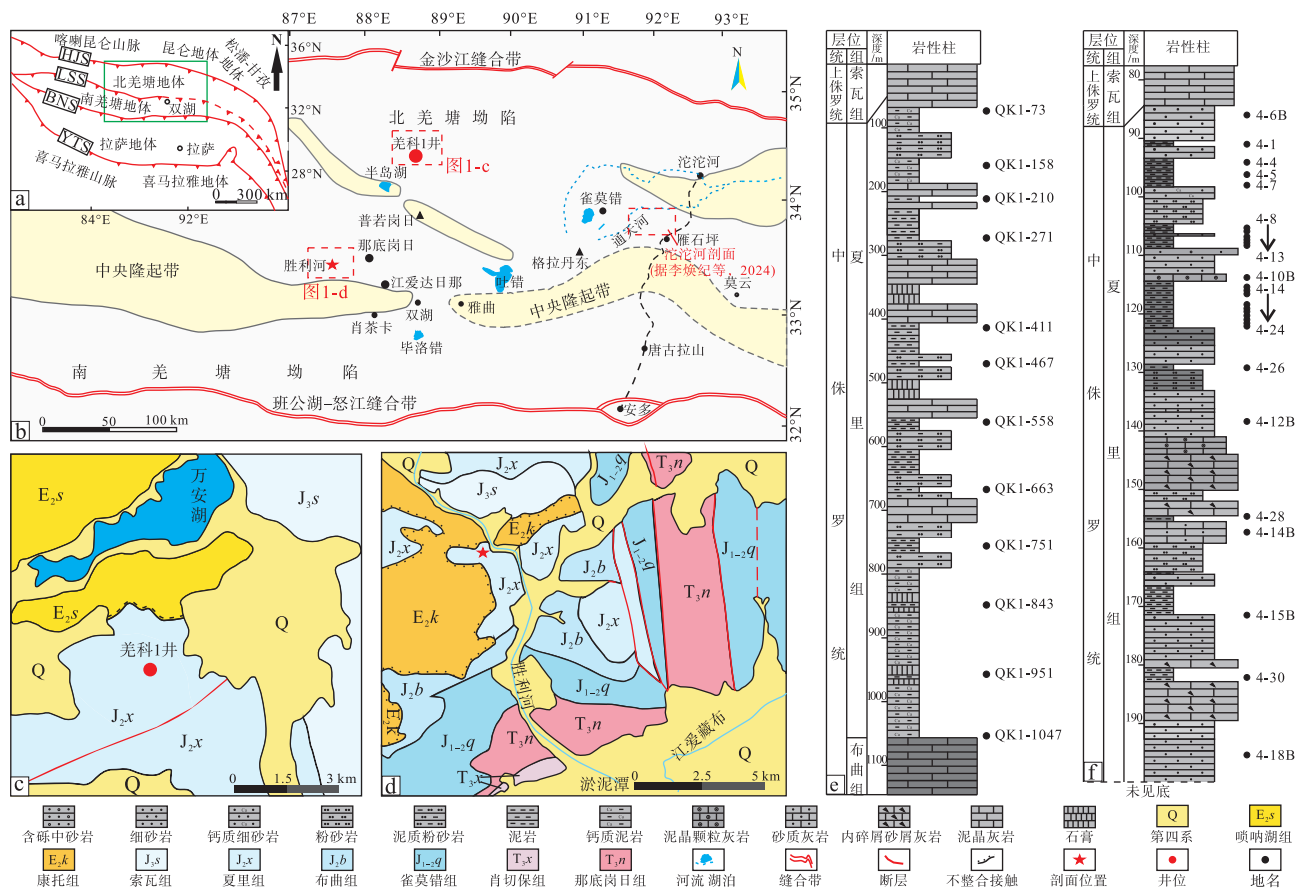
羌塘盆地夏里组广泛出露地表,前人研究主要集中在石油地质条件分析(李亚林等, 2008)、沉积古环境重建(夏国清等, 2010)及成盐前景评价方面(曾永耀等, 2014; Fang *et al.*, 2016; 徐其辉等, 2023),而对其沉积物源及大地构造属性研究涉及较少。基于此,本研究拟以北羌塘坳陷西南缘胜利河西剖面及中部羌科 1 井夏里组砂岩和泥岩为研究对象,通过主量元素、微量及稀土元素、砂岩碎屑颗粒组分特征及前人研究成果来约束夏里组碎屑岩的化学风化历史、沉积物源及

大地构造属性,进而探讨侏罗纪羌塘盆地性质及形成的地球动力学机制。研究成果对揭示夏里组成盐古构造环境具有重要意义。

2 区域地质背景

羌塘盆地位于青藏高原腹部(图 1-a),是该地区最大的海相沉积盆地,面积约 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ (王剑等, 2004)。该盆地北邻可可西里—金沙江缝合带,南邻班公湖—怒江缝合带,可进一步划分为南羌塘坳陷、北羌塘坳陷和中央隆起带 3 个次级构造单元(图 1-b),构成了“两坳夹一隆”的羌塘盆地构造格局(谭富文等, 2002; 王剑等, 2004; 吴珍汉等, 2014)。最新高精度航磁资料显示,南、北羌塘具有截然不同的重磁场特征,为 2 个完全不同的构造单元,中央隆起带为晚三叠世龙木错—双湖古特提斯洋关闭形成的缝合带(熊盛青等, 2020; 周道卿等, 2021)。中生代羌塘盆地的形成演化受其北侧可可西里—金沙江古特提斯洋、中部龙木错—双湖古特提斯洋及南侧班公湖—怒江新特提斯洋演化控制。可可西里—金沙江古特提斯洋于晚泥盆世打开,石炭纪—晚二叠世处于持续扩张期,晚二叠世—中三叠世分别向北和向南双向俯冲,晚三叠世早期消亡闭合(Kapp *et al.*, 2003; Ding *et al.*, 2013)。中部龙木错—双湖古特提斯洋于寒武纪初始裂解,奥陶纪—泥盆纪处于扩张阶段,石炭纪—早三叠世发生多期次俯冲消减,中—晚三叠世早期闭合消亡(李才等, 2007)。班公湖—怒江新特提斯洋演化较晚,其于二叠纪早期打开,晚二叠世—晚三叠世进入持续扩张期,早侏罗世向北局部俯冲,中侏罗世进入全面俯冲消减阶段,晚侏罗世—早白垩世闭合消亡(Hu *et al.*, 2022)。

自侏罗纪以来,北羌塘坳陷连续发育中—下侏罗统雀莫错组、中侏罗统布曲组、中侏罗统夏里组、上侏罗统索瓦组及上侏罗统一下白垩统白龙冰河组,这些地层构成了侏罗纪海相盆地的主体(王剑等, 2004)。侏罗系整体具“三砂夹两灰”的特点,这是对大规模海侵—海退旋回的沉积响应(李勇等, 2001; 王剑等, 2004; 王剑和付修根, 2018)。区域上,夏里组碎屑岩地层中产丰富的 *Chilidactylus* (*Radulopecten*) *vegans* (sowerby), *Plagiostoma* sp., *Pterperna burensis*, *Ansisocardia tenera*, *Pro-*



a—青藏高原构造单元；b—羌塘盆地构造单元；c—羌科1井地区地质简图；d—胜利河西地区地质简图；e—羌科1井夏里组地层柱状图及采样位置；f—胜利河西剖面夏里组地层柱状图及采样位置

图1 北羌塘坳陷羌科1井和胜利河西地区地质简图及夏里组地层柱状图和采样位置

Fig. 1 Brief geologic map, stratigraphic column and sampling positions of the Well QK-1 and Shenglihexi area in North Qiangtang Depression

tocardia stichlandi 等双壳类化石和 *Dorsoplicathyris ovalis*, *urmannella penptyChina* 等腕足类化石, 据此将其时代归属为中侏罗世卡洛期 (王剑等, 2009)。近年来, 关于夏里组形成时代也有不同的认识, 如 Fang 等 (2016) 依据磁性地层学的原理和方法将雁石坪地区的夏里组形成时代归属为中—晚侏罗世, 李焕纪等 (2024) 基于碎屑锆石定年数据认为夏里组的最大沉积年龄不早于 173 Ma, 为中侏罗世。

羌科1井位于北羌塘坳陷中部半岛湖地区 (图 1-b, 1-c), 是目前全球海拔最高 (井口海拔 5030 m) 的第1口高原油气科探井, 井深 4696.18 m, 从上到下分别钻遇了上侏罗统索瓦组、中侏罗统夏里组和布曲组、中—下侏罗统雀莫错组及上三叠统那底岗日组 (王剑等, 2020, 2022)。夏里组井深为 50~1050 m, 与上覆索瓦组和下伏布

曲组均呈整合接触, 并可进一步分为2段, 其中下段主要为灰色含膏泥岩、钙质泥岩夹硬石膏层, 上段主要为灰色钙质泥岩夹泥晶灰岩、泥岩、砂岩及粉砂岩, 主要形成于潮坪—潟湖环境 (王剑等, 2020)。

胜利河西剖面位于北羌塘坳陷西南缘, 毗邻中央隆起带 (图 1-b, 1-d), 夏里组出露厚度约 116 m, 未见底。下部主要为灰色细砂岩、紫红色粉砂岩及灰色颗粒灰岩的不等厚互层, 内部夹少量薄层灰色粉砂质泥岩, 发育明显的波纹层理; 向上砂岩粒度变细, 颗粒灰岩含量减少, 泥页岩增多, 主要为灰色粉细砂岩、粉砂岩, 夹深灰色泥页岩和少量泥晶灰岩。夏里组砂岩发育浪成波纹层理, 沉积序列上见典型混积岩及混积层系, 指示开阔、强水动力条件的混积滨岸环境 (李磊等, 2025a)。

3 样品与方法

本次研究在北羌塘坳陷胜利河西剖面及羌科 1 井夏里组自下而上分别采集 24 件和 12 件样品(包含 30 件泥岩、4 件砂岩和 2 件砂质灰岩), 具体采样位置见图 1-e 和图 1-f。为了避免污染, 样品表面的风化物及其脉体均被剔除, 并存于密封袋中。本次研究针对 36 件样品开展了系统的元素地球化学分析(主量、微量和稀土元素), 同时针对 4 件砂岩和 2 件砂质灰岩样品开展了显微特征观察。

主量元素和微量元素分析在核工业北京地质研究院完成, 分别通过 Philips PW2404 X 射线荧光光谱仪(XRF)和 Finnigan MAT 高分辨率电感耦合等离子体质谱仪(HR-ICP-MS)进行测试。全岩主量元素分析采用熔片法, 首先称取 0.5 g 全岩粉末(200 目)和 5 g 助熔剂放入铂金坩埚中均匀混合并加热至 1050 °C; 随后将熔融后的液体倒入指定模具中, 待冷却后制成熔片, 测试流程参照 GB/T 14506.28-2010 标准。烧失量测定是称取 1 g 干燥的粉末样品放入刚玉坩埚中, 随后将其放在马沸炉中加热至 1000 °C 并持续 90 min, 待马沸炉冷却后称量并记录加热过程中烧失的重量。微量元素和稀土元素分析采用酸溶法, 称取 0.5 g 烘干的全岩粉末置于 Teflon 坩埚中, 加入 1~2 滴高纯水润湿样品, 然后依次加入 1.5 mL 高纯 HNO₃ 和 1.5 mL 高纯 HF, 将 Teflon 坩埚放入钢套, 拧紧后置于烘箱中于 190±5 °C 恒温加热 48 h。待坩埚冷却后开盖置于电热板上蒸干(140 °C 恒温), 然后加入 1 mL HNO₃ 并再次蒸干, 再加入 3 mL 浓度 30% 的 HNO₃, 再次将 Teflon 坩埚放入钢套, 拧紧后置于烘箱中于 190±5 °C 恒温加热 12 h; 将溶液转入聚乙烯塑料瓶中, 并用浓度 2% 的 HNO₃ 稀释至 100 g(稀释因子为 2000), 密闭保存以备测试, 测试流程参照 GB/T 14506.30-2010 标准。主、微量元素测试误差均低于 5%。

针对岩石薄片, 主要是观察岩石中碎屑颗粒组成、填隙物成分、结构、粒度、圆度、形状、表面特征及成熟度等特征。该项工作在西南石油大学实验室完成, 使用仪器为德国徕卡 DM750P 偏光显微镜。

4 结果

4.1 岩石学特征

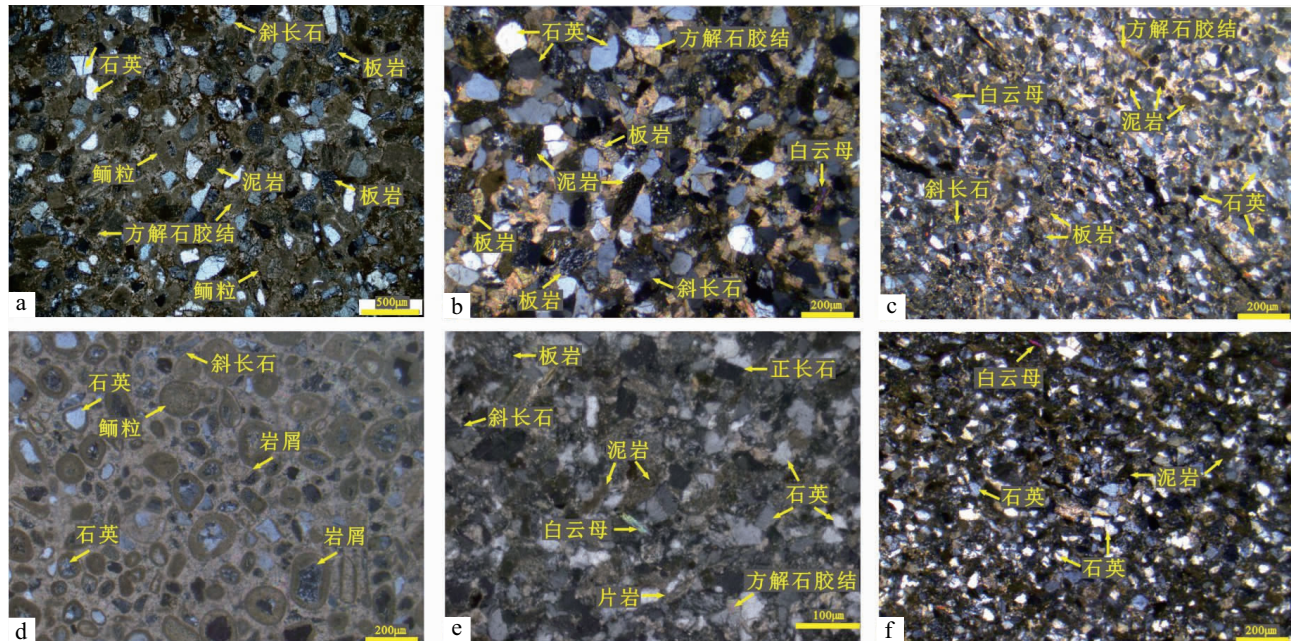
胜利河西剖面夏里组 4-6B 和 4-14B 样品以碳酸盐组分为主, 含少量石英、长石及岩屑(10%~20%)。碎屑颗粒以棱角状一次棱角状为主(图 2-a, 2-d), 而碳酸盐颗粒组分多为鲕粒, 鲕粒主要呈放射状, 部分鲕粒核心为石英颗粒或变质石英岩, 可见少量的变质岩岩屑(图 2-a, 2-d)。相比之下, 4-6B 样品含有更多的碎屑组分, 故将其定名为砂质鲕粒灰岩(图 2-a), 而 4-14B 样品定名为含砂质鲕粒灰岩(图 2-d)。样品 4-10B 和 4-12B 整体上以棱角状一次棱角状的陆源碎屑颗粒为主, 碎屑颗粒之间充填大量泥晶和亮晶方解石胶结物及少量顺层分布的沥青(图 2-c), 以颗粒支撑为主(图 2-b, 2-c), 为灰质岩屑砂岩。样品 4-15B 和 4-18B 中陆源碎屑颗粒组分显著增多, 碳酸盐组分明显减少(图 2-e, 2-f), 为典型的碎屑岩。

在 4 件砂岩样品(4-10B, 4-12B, 4-15B 和 4-18B)中, 石英含量最多, 达 60%~65%, 以棱角状一次棱角状的单晶石英为主, 多晶石英较少, 整体为次圆状, 重结晶作用较强, 局部可见少量燧石(图 2-b, 2-c, 2-e, 2-f)。岩屑含量为 28%~32%, 以次棱角状的低级变质岩岩屑(板岩和片岩)为主, 含少量泥岩岩屑(图 2-b, 2-c, 2-e)。长石含量最少, 仅 2%~5%, 可见次棱角状斜长石(见细的聚片双晶)及卡氏双晶正长石, 部分发生黏土化和绢云母化(图 2-b, 2-e)。整体上, 胜利河西剖面夏里组砂岩具有较低的成分成熟度和结构成熟度。

4.2 元素地球化学特征

4.2.1 主量元素

北羌塘坳陷胜利河西剖面及羌科 1 井夏里组样品主量元素分析结果见附表 1。夏里组泥岩样品中, SiO₂ 和 Al₂O₃ 含量分别为 39.2%~59.3% (均值为 55.0%) 和 11.1%~18.6% (均值为 15.2%), Fe₂O₃^T 和 MgO 含量分别为 3.61%~8.37% (均值为 6.19%) 和 1.78%~3.89% (均值为 2.83%), 碱金属 Na₂O 和 K₂O 含量分别为 0.20%~1.59% (均值为 0.63%) 和 2.11%~4.51% (均值为 3.61%),



a—砂质鲕粒灰岩, 样品 4-6B; b—灰质岩屑砂岩, 样品 4-10B; c—灰质岩屑砂岩, 样品 4-12B; d—含砂质鲕粒灰岩, 样品 4-14B; e—细粒岩屑砂岩, 样品 4-15B; f—细粒岩屑砂岩, 样品 4-18B

图 2 北羌塘坳陷胜利河西剖面夏里组岩石薄片显微特征 (正交偏光)

Fig. 2 Microscopical characteristics of the Xiali Formation rocks from Shenglihexi section, North Qiangtang Depression (Cross-polarized light)

CaO 和 TiO_2 含量分别为 1.97%~17.6% (均值为 5.36%) 和 0.57%~1.30% (均值为 0.96%), MnO 和 P_2O_5 含量均低于 1%。与羌科 1 井泥岩相比, 胜利河西剖面泥岩普遍具有更高的 Fe_2O_3^T 、MgO、 K_2O 和 TiO_2 含量及更低的 Na_2O 和 MnO 含量。胜利河西剖面砂岩中, SiO_2 含量波动较大, 含量为 58.6%~70.2% (均值为 64.4%), Al_2O_3 和 CaO 含量分别为 4.50%~9.73% (均值为 8.10%) 和 4.39%~9.82% (均值为 7.05%), Fe_2O_3^T 和 MgO 含量分别为 3.87%~4.34% (均值为 4.11%) 和 1.83%~4.99% (均值为 2.72%), K_2O 和 Na_2O 含量分别为 1.15%~2.21% (均值为 1.81%) 和 0.37%~1.20% (均值为 0.81%), TiO_2 含量为 0.67%~1.33% (均值为 1.00%), 其他氧化物如 MnO 和 P_2O_5 含量均低于 1%。胜利河西剖面夏里组砂质灰岩 (样品 4-6B 和样品 4-14B) 比砂岩具有更低的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3^T 、MgO、 K_2O 、 TiO_2 含量和更高的 CaO 含量。

夏里组碎屑岩主量元素含量经大陆上地壳标准化后, SiO_2 、MnO 和 P_2O_5 呈弱的亏损, Na_2O 则为显著亏损, CaO 和 TiO_2 以富集为主, Al_2O_3 、

Fe_2O_3^T 、MgO 和 K_2O 既有亏损又有富集 (图 3-a)。砂质灰岩样品中, SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3^T 、MgO、 K_2O 、 TiO_2 和 P_2O_5 表现出弱的亏损, MnO 呈弱富集, Na_2O 和 CaO 分别为显著亏损和显著富集 (图 3-a)。在 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ vs. $\text{Fe}_2\text{O}_3^T/\text{K}_2\text{O}$ 判别图解中, 胜利河西剖面和羌科 1 井大多数泥岩样品都位于页岩区域, 砂岩样品几乎都位于岩屑砂岩区域 (图 4), 该结果与薄片观察结果 (图 2) 基本一致。

夏里组碎屑岩中, K_2O 与 Al_2O_3 之间具有显著的相关性 (图 5-a), 与 Na_2O 之间无相关性, 表明 K_2O 主要来源于黏土矿物, 而非长石矿物 (Ross and Bustin, 2009)。 Fe_2O_3^T 、MgO 与 Al_2O_3 之间具有显著的相关性 (图 5-b, 5-c), 且 MgO 与 CaO 之间呈较显著负相关 (图 5-d), 表明 Fe_2O_3^T 和 MgO 具有相同的性质, 且多来源于陆源碎屑, 而非碳酸盐矿物。 TiO_2 和 Al_2O_3 之间具有显著的正相关性 (图 5-e), 表明大部分 Ti 来自于陆源碎屑, 并以重矿物的形式赋存于黏土矿物中。 SiO_2 与 Al_2O_3 之间无相关性 (图 5-f), 表明 Si 非黏土矿物来源, 可能主要赋存于石英碎屑中。

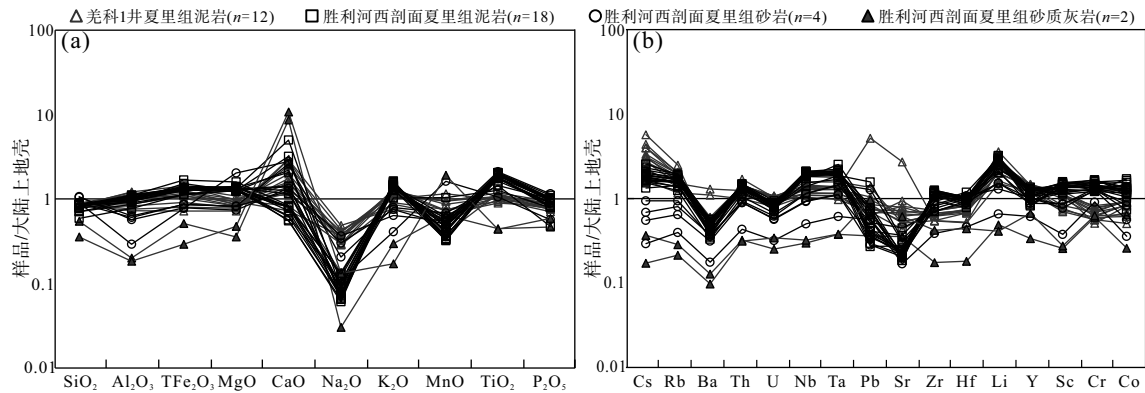


图 3 北羌塘拗陷胜利河西剖面和羌科 1 井夏里组样品主量元素 (a) 和微量元素 (b) 蛛网图

Fig. 3 UCC-normalized major element (a) and trace element (b) spider diagrams of the Xiali Formation from Shenglihexi section and Well QK-1, North Qiangtang Depression

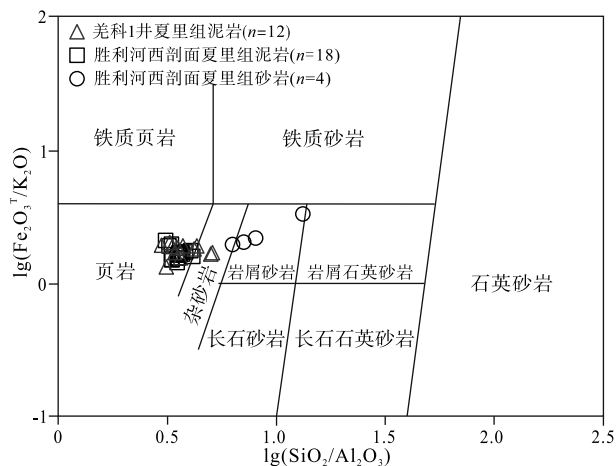


图 4 北羌塘拗陷胜利河西剖面和羌科 1 井夏里组碎屑岩岩性判别图 (据 Herron, 1988; 有修改)

Fig. 4 Chemical classification of the Xiali Formation clastic rocks from Shenglihexi section and Well QK-1, North Qiangtang Depression (modified from Herron, 1988)

4.2.2 微量元素

胜利河西剖面和羌科 1 井夏里组样品微量元素分析结果见附表 2, 其中泥岩微量元素含量普遍高于砂岩和砂质灰岩 (Sr、Pb 和 Hf 除外)。

泥岩中大离子亲石元素 Rb、Sr、Cs、Ba、Pb、Th 和 U 的含量分别为 97.8~209.0 $\mu\text{g/g}$ 、59.0~863.0 $\mu\text{g/g}$ 、6.51~27.8 $\mu\text{g/g}$ 、208~813 $\mu\text{g/g}$ 、4.62~87.80 $\mu\text{g/g}$ 、10.4~17.7 $\mu\text{g/g}$ 和 1.80~2.90 $\mu\text{g/g}$ 。相比而言, 羌科 1 井夏里组泥岩中元素 Cs、U、Pb 和 Sr 含量普遍高于胜利河西剖面。此外, 泥岩中元素 Rb、Ba 和 Th 含量普遍高于砂岩和砂质灰岩。经大陆上地壳标准化后, 砂岩和砂质灰岩

中大离子亲石元素都表现出明显的亏损, 而泥岩中大离子亲石元素 Rb、Cs 和 Th 呈一定的富集, 但 Ba、U、Pb 和 Sr 普遍表现为亏损 (图 3-b)。

泥岩中高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf 和 Y 含量分别为 12.4~25.3 $\mu\text{g/g}$ 、0.87~2.26 $\mu\text{g/g}$ 、105~241 $\mu\text{g/g}$ 、2.74~6.29 $\mu\text{g/g}$ 和 17.1~30.9 $\mu\text{g/g}$ 。相比而言, 羌科 1 井夏里组泥岩中元素 Nb、Ta 含量普遍低于胜利河西剖面, 但高于砂岩和砂质灰岩; 元素 Zr、Hf 含量高于胜利河西剖面砂质灰岩, 但低于泥岩和砂岩; 元素 Y 含量普遍高于胜利河西剖面。经大陆上地壳标准化后, 泥岩中元素 Nb、Ta 及 Y 普遍表现出一定的富集, 而 Zr 和 Hf 元素在羌科 1 井泥岩中表现为亏损, 但在胜利河西剖面泥岩中既有亏损又有弱富集 (图 3-b)。胜利河西剖面砂质灰岩中元素 Nb、Ta、Zr、Hf 和 Y 含量均表现出一定程度的亏损, 砂岩中 Nb、Ta、Hf 和 Y 含量既有亏损又有富集, Zr 含量表现出一定的亏损。

泥岩中过渡元素 Sc、Cr 和 Co 含量分别为 9.77~22.1 $\mu\text{g/g}$ 、47~152 $\mu\text{g/g}$ 和 8.77~29.5 $\mu\text{g/g}$ 。与大陆上地壳相比, 胜利河西剖面泥岩中元素 Sc、Cr 和 Co 均表现出一定程度的富集, 砂质灰岩中 Sc、Cr 和 Co 均表现出一定程度的亏损, 砂岩中 Sc 和 Co 表现出一定亏损, 而 Cr 既有亏损又有富集。元素 Cr 和 Co 在羌科 1 井泥岩中呈不同程度的亏损, 但 Sc 元素既有亏损又有富集 (图 3-b)。

4.2.3 稀土元素

胜利河西剖面和羌科 1 井夏里组样品稀土元素

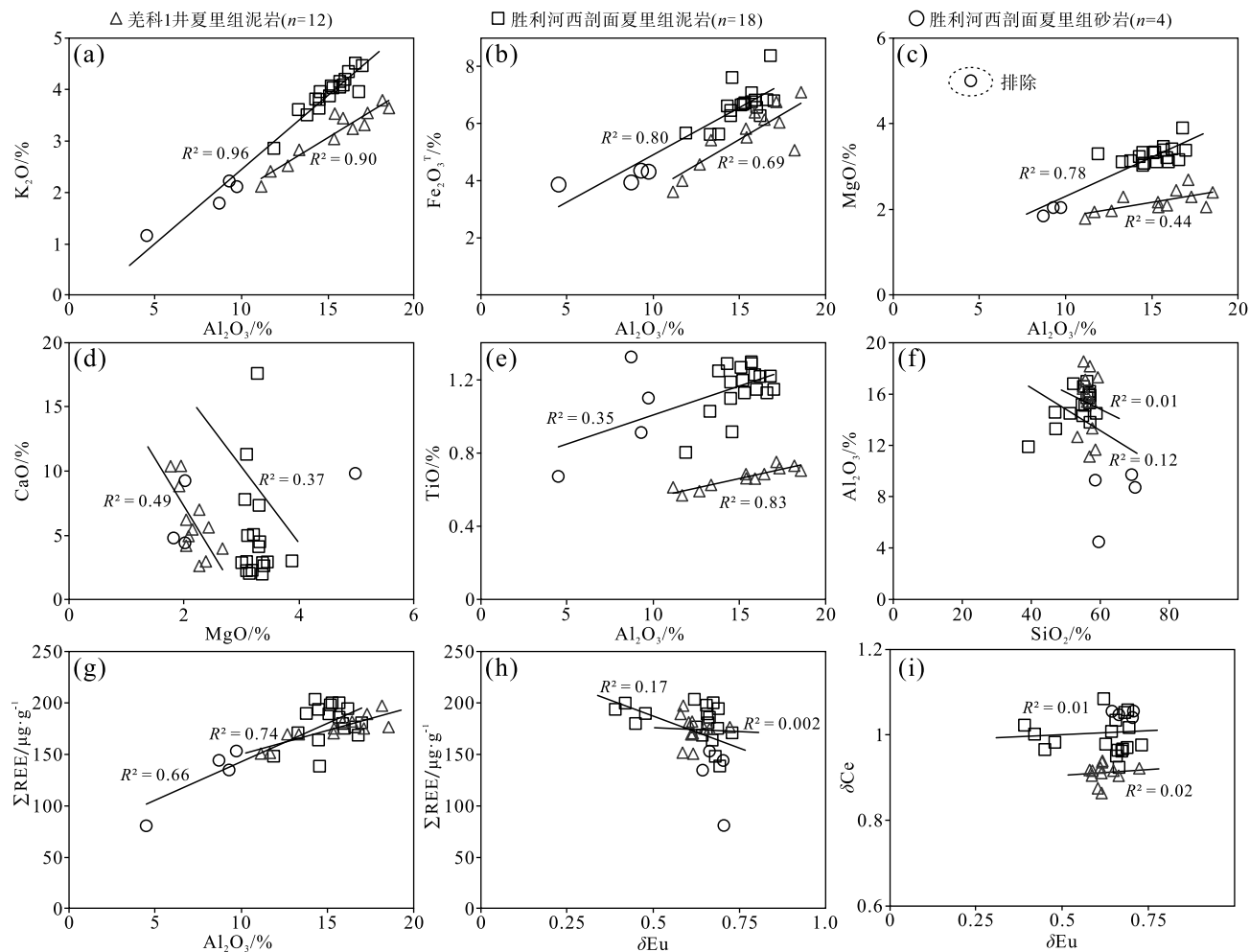


图 5 北羌塘坳陷胜利河西剖面及羌科 1 井夏里组碎屑岩样品各类型指标之间的相关性

Fig. 5 Correlation between various types of geochemical indicators of the Xiali Formation clastic rocks from Shenglihexi section and Well QK-1, North Qiangtang Depression

分析结果见附表 3。测试结果表明,夏里组稀土元素总量 (ΣREE) 波动较大,为 $51.4 \sim 203 \mu\text{g/g}$,其中砂岩样品 ($80.0 \sim 153.0 \mu\text{g/g}$) 和砂质灰岩样品 ($51.4 \sim 87.0 \mu\text{g/g}$) 稀土元素总量普遍低于大陆上地壳稀土元素含量的总和 ($148 \mu\text{g/g}$; Rudnick and Gao, 2003),而泥岩样品 ($138 \sim 203 \mu\text{g/g}$) 虽高于大陆上地壳稀土元素含量总和,但普遍低于澳大利亚后太古代平均页岩的含量 ($185 \mu\text{g/g}$; Taylor and McLennan, 1985)。相比而言,羌科 1 井及胜利河西剖面夏里组泥岩稀土元素含量无明显差异。轻稀土元素含量 ($45.7 \sim 183 \mu\text{g/g}$) 均明显高于重稀土 ($5.69 \sim 21.2 \mu\text{g/g}$), LREE/HREE 值为 $6.53 \sim 11.7$,表明轻、重稀土元素发生了明显的分异,其中胜利河西剖面泥岩稀土元素分异作用强度普遍高于羌科 1 井泥岩,而砂岩

和砂质灰岩分异作用则更弱。研究区夏里组样品、大陆上地壳及澳大利亚后太古代平均页岩稀土元素经球粒陨石标准化后如图 6 所示,表现为夏里组样品稀土元素配分曲线与澳大利亚后太古代平均页岩及大陆上地壳曲线类似,呈轻稀土元素富集、重稀土元素相对平稳。研究区样品经球粒陨石标准化后的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 $7.54 \sim 11.4$,同样反映轻、重稀土元素分异程度高。研究区碎屑岩样品稀土元素总量 (ΣREE) 与 Al_2O_3 含量之间具有显著的相关性 (图 5-g),表明其主要来源于陆源碎屑的输入。另外,研究区样品均表现出明显的 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.39 \sim 0.76$; 均值为 0.63),但基本未出现 Ce 异常 ($\delta\text{Ce} = 0.86 \sim 1.08$; 均值为 0.98),同时 δEu 、 δCe 与 ΣREE 之间基本无相关性 (图 5-h, 5-i)。

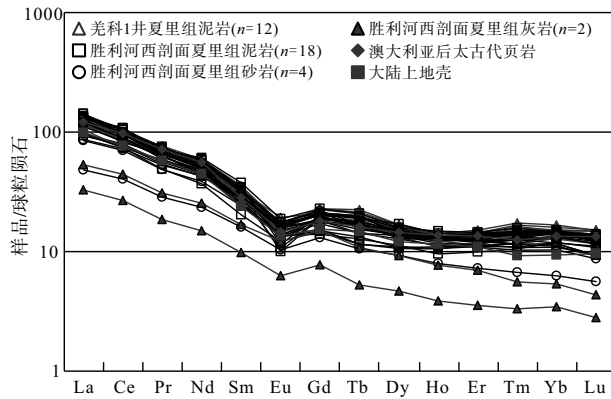


图 6 北羌塘坳陷胜利河西剖面和羌科 1 井夏里组样品经球粒陨石标准化的稀土元素配分曲线

Fig. 6 Chondrite-normalized rare earth element distribution diagrams of the Xiali Formation from Shenglihexi section and Well QK-1, North Qiangtang Depression

5 讨论

5.1 物源区化学风化作用

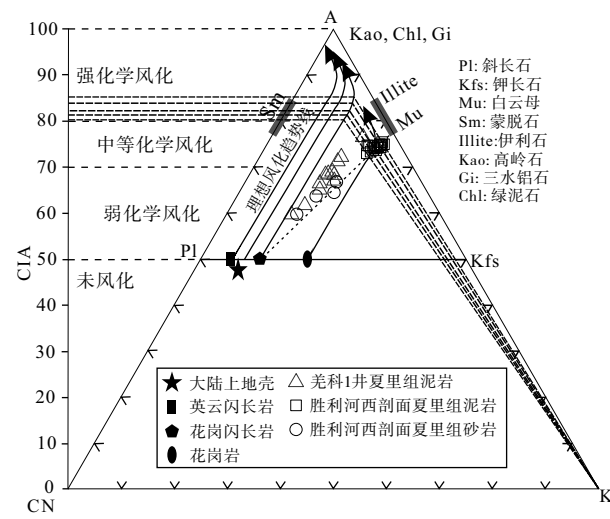
物源区的风化过程往往会导致碱金属元素和碱土金属元素离子（如 K^+ 和 Na^+ ）发生迁移，而某些稳定元素离子（ Al^{3+} 和 Ti^{4+} 等）则不易迁移依然滞留在沉积物中（Nesbitt and Young, 1982; Fedo *et al.*, 1995）。因此，可以利用某些特定元素的含量和比值来评价源区的化学风化强度（Price and Velbel, 2003; Roy and Roser, 2013; Yang *et al.*, 2016）。

Nesbitt 和 Young（1982）提出的化学蚀变指数（CIA）在定量判别物源区化学风化程度方面应用最广（冯连君等, 2003; Yan *et al.*, 2010; Hessler *et al.*, 2017），其计算公式为 $CIA = \text{molar} [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100$ ，其中 CaO^* 仅指硅酸盐中的 CaO 含量（Nesbitt and Young, 1982）。但截至目前，仍无直接的方法用于区分硅酸盐和非硅酸盐（磷酸盐和碳酸盐岩）中的 CaO 含量。本研究中 CaO^* 的获取采用 McLennan 等（1993）提出的校正方法， $\text{molar} (CaO_{\text{剩余}}) = \text{molar} (CaO - P_2O_5 \times 10/3)$ ，若 $\text{molar} (CaO_{\text{剩余}}) < \text{molar} (Na_2O)$ ，则 $\text{molar} (CaO^*) = \text{molar} (CaO_{\text{剩余}})$ ；若 $\text{molar} (CaO_{\text{剩余}}) > \text{molar} (Na_2O)$ ，则 $\text{molar} (CaO^*) = \text{molar} (Na_2O)$ 。值得注意的是，化学蚀变指数（CIA）易受成岩过程中钾交代作用、沉积再循环作用、粒度及分选的影响（Cox *et al.*,

1995; Roy and Roser, 2013; Yang *et al.*, 2016; 徐小涛和邵龙义, 2018），故在开展物源区风化作用研究时必须对上述因素的影响进行评估，以保证风化作用强度判别的准确性和可靠性。

5.1.1 钾交代作用对化学风化指数的影响

通过碎屑岩的 CIA 指数来评估化学风化作用强度时首先需要考虑的是成岩作用和钾交代作用（Rieu *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2016; 徐小涛和邵龙义, 2018; Wang *et al.*, 2023）。本研究采用 Nesbitt 和 Young（1982）提出的 A-CN-K 图解（图 7）来探讨化学风化作用是否受成岩作用和钾交代作用的影响。来自弱风化区的物源具有较低的 CIA 值（50~70）且靠近长石端元，来自强烈风化区的物源具有高的 CIA 值（80~100）且靠近 A 端元（Nesbitt and Young, 1982; McLennan, 1993）。如果样品的 CIA 值在 A-CN-K 图解中偏离理想风化趋势线（平行 A-CN 轴），表明其遭受到成岩作用和钾交代作用的影响，偏离趋势线越远，受钾交代作用越强（Yan *et al.*, 2010; 徐小涛和邵龙义, 2018）。在 A-CN-K 图解（图 7）中，羌科 1 井泥岩样品的 CIA 值与花岗闪长岩的理想风化趋势线近乎平行，表明该样品几乎未受钾交代作用的影响，其 CIA 值可以真实反映物源区的化学风化强度。胜利河西剖面砂岩样品 K_2O 含量（0.48%~



A: Al_2O_3 ; CN: $CaO^* + Na_2O$; K: K_2O ; CIA: 化学蚀变指数

图 7 北羌塘坳陷胜利河西剖面和羌科 1 井夏里组样品 A-CN-K 三角图（据 Nesbitt and Young, 1982）

Fig. 7 A-CN-K ternary diagram of the Xiali Formation from Shenglihexi section and Well QK-1, North Qiangtang Depression (after Nesbitt and Young, 1982)

2.85%) 明显低于大陆上地壳 (2.80%) 和澳大利亚后太古代页岩 (3.68%), 反映砂岩样品几乎未受钾交代作用的影响, 但砂岩计算出的 CIA 值不能采用泥岩的判断标准来分析物源区风化程度 (徐小涛和邵龙义, 2018)。胜利河西剖面泥岩样品偏离理想风化趋势线较为严重, 且具有较高的 K_2O 含量 (3.50%~4.51%), 反映该样品受钾交代作用较为明显, 故钾交代校正后的泥岩 CIA 值 (CIA_{corr}) 可以反映物源区的化学风化强度。

5.1.2 沉积再旋回作用对化学风化指数的影响

沉积旋回主要控制着岩石的成分成熟度, 在一定程度上影响其化学成分及化学风化程度 (Cox *et al.*, 1995)。成分变异指数 (ICV; Cox *et al.*, 1995) 是判断沉积物是否经历过沉积旋回较为常用的方法 (Armstrong-Altrin *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2023; 秦何星等, 2024), 计算公式为 $ICV = (Fe_2O_3^T + K_2O + Na_2O + CaO^* + MgO + MnO + TiO_2) / Al_2O_3$, 式中氧化物为摩尔量。一般情况下, 碎屑岩中的云母、高岭石和伊利石等矿物中 Al_2O_3 含量较高, ICV 值小于 1, 而长石、辉石和

角闪石等造岩矿物中 Al_2O_3 含量较低, ICV 值大于 1 (Cox *et al.*, 1995; 冯连君等, 2003; 徐小涛和邵龙义, 2018)。高成分成熟度常具有低的 ICV 值, 代表再旋回的产物或者是在强风化作用下初次沉积的产物, 而低成分成熟度沉积物则具有高的 ICV 值, 代表在构造活动带内初次旋回的产物 (Cox *et al.*, 1995; 徐小涛和邵龙义, 2018; Wang *et al.*, 2023)。胜利河西剖面和羌科 1 井中侏罗统夏里组碎屑岩样品的 ICV 值分别为 0.83~1.37 (均值为 1.14) 和 1.17~4.17 (均值为 1.50), 绝大多数样品的 ICV 值都大于 1.0 (图 8-a), 表明夏里组碎屑岩样品主要来源于不成熟的物源区, 没有经历多期次的沉积旋回, 是构造活动带首次沉积的产物。

此外, 沉积循环过程通常会导致某些重矿物 (如 Zr) 的富集 (McLennan *et al.*, 1993), 故重矿物中的微量元素 (如锆石中的 Zr) 也可用于评估沉积旋回作用。碎屑岩中 Th/Sc 和 Zr/Sc 值及它们的交汇图是评价物源区沉积循环和成分变化的重要方法 (McLennan *et al.*, 1993; Ma *et al.*, 2015)。

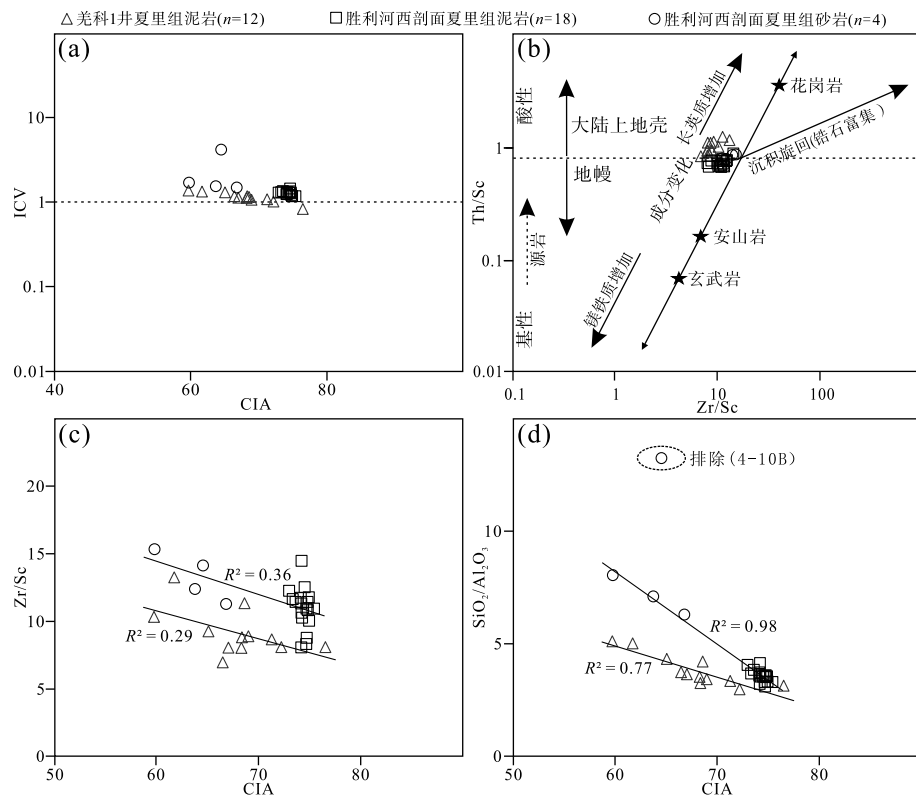


图 8 北羌塘坳陷胜利河西剖面和羌科 1 井夏里组碎屑岩化学风化指数 (CIA) 及其影响因素评价图

Fig. 8 Binary diagrams for evaluating major factors affecting CIA values of the Xiali Formation clastic rocks from Shenglihexi section and Well QK-1, North Qiangtang Depression

羌科 1 井夏里组泥页岩 Zr/Sc 值和 Th/Sc 值分别为 6.93~13.2 (均值为 9.11) 和 0.84~1.25 (均值为 1.02), 比胜利河西剖面夏里组砂岩和泥岩的 Zr/Sc 值 (8.05~21.0, 均值为 11.7) 和 Th/Sc 值 (0.67~0.89, 均值为 0.74) 略高 (附表 2)。在 Th/Sc vs. Zr/Sc 交汇图 (图 8-b) 中, 研究区夏里组碎屑岩样品位于成分变化的趋势线上, 远离沉积旋回趋势线, 反映夏里组碎屑岩沉积过程中基本未受沉积旋回的影响。同时, 研究区夏里组碎屑岩样品 CIA 值与 Zr/Sc 值无正相关性 (图 8-c)。因此, 研究区夏里组碎屑岩弱的沉积旋回反映 CIA 值并非沉积物循环过程中化学风化作用累积的结果, 而是直接代表了物源区的化学风化强度。

5.1.3 颗粒大小与分选性对化学风化指数的影响

对悬浮沉积物和现代河流河床沉积物研究时发现, 分选性和颗粒大小是影响沉积物化学成分最重要的因素, 进而影响风化指标的真实性和可靠性 (Korsch, 1993; Roy and Roser, 2013; Guo *et al.*, 2018), 因此在对化学风化程度解释时必须对颗粒大小和沉积分选的影响进行判断。本次研究选取粒度大小不同的砂岩和颗粒较细的泥岩进行化学风化程度对比。胜利河西剖面夏里组泥岩和砂岩的 CIA 值具有明显的差异, 可能反映了 CIA 值受碎屑颗粒大小的控制。 SiO_2/Al_2O_3 值是反映颗粒大小和分选性的一个重要指标, 其通常随着分选性变好或粒度变粗而增大 (Armstrong-Altrin *et al.*, 2012; Roy and Roser, 2013)。羌科 1 井和胜利河西剖面夏里组泥页岩 SiO_2/Al_2O_3 值波动小, 分别为 2.98~5.11 (均值为 3.81) 和 3.11~4.14 (均值 3.57), 普遍高于 PAAS 和低于 UCC 的 SiO_2/Al_2O_3 值 (分别为 3.32 和 4.32; Taylor and McLennan, 1985; Rudnick and Gao, 2003)。相比而言, 胜利河西剖面夏里组砂岩 SiO_2/Al_2O_3 值明显偏高且波动较大, 为 6.30~13.3 (均值为 9.13; 附表 1)。研究区碎屑岩样品 CIA 值和 SiO_2/Al_2O_3 值之间均呈显著的负相关性 (图 8-d), 表明颗粒大小和分选性对 CIA 值的影响较大, 因此研究区泥页岩的 CIA 值更能真实反映源区的化学风化程度。

5.1.4 物源区化学风化强度

上述研究表明研究区夏里组碎屑岩化学风化指数 CIA 受颗粒大小与分选性影响较大, 但基本不受沉积旋回的影响, 因此在恢复北羌塘坳陷夏里组

物源区化学风化强度时应选取泥页岩样品进行约束。通常情况下, 未风化物源区的 CIA 值低于 50, CIA 值介于 50~70 之间则反映较弱的化学风化强度, CIA 值介于 70~80 之间反映中等的化学风化强度, CIA 值大于 80 时则反映强烈的化学风化强度 (Fedo *et al.*, 1995)。

研究区羌科 1 井夏里组泥页岩的 CIA 值为 60~77 (均值为 68), 该值基本不受钾交代作用影响 (图 7)。从 CIA 值垂向分布来看, 羌科 1 井上部 (68~77) 和下部 (68~72) 样品 CIA 值整体高于中部 (60~67), 具有先减小后增大的变化趋势, 反映羌科 1 井地区夏里组泥页岩物源区经历了中等一弱的化学风化作用。

胜利河西剖面夏里组泥页岩样品的 CIA 值为 73~75 (均值为 74), 但该值受钾交代作用影响较大 (图 7)。本研究主要采用 Nesbitt 和 Young 等 (1982) 提出的 A-CN-K 三角图进行钾校正: 首先在 A-CN-K 三角图中作 1 条尽可能穿过所有钾交代泥岩样品的假想线, 并让其与斜长石—钾长石线相交, 过交点作 1 条平行于 A-CN 的虚线, 该虚线则代表样品未发生钾交代作用的理想风化趋势线; 然后, 通过 K 端元作 1 条与样品点连线反向的延伸线, 并与样品的理想风化趋势线相交, 交点值即代表钾交代作用之前样品的 CIA 值 (Fedo *et al.*, 1995)。胜利河西剖面夏里组泥页岩样品经钾校正后的 CIA (CIA_{corr}) 值为 80~85 (图 7), 表明胜利河地区夏里组物源区经历了强烈的化学风化作用。胜利河西剖面夏里组泥页岩 CIA 值明显高于羌科 1 井泥页岩样品, 主要是由于胜利河西剖面夏里组层位仅对应羌科 1 井上部某一段。

5.2 物源属性

碎屑岩中某些微量元素, 如 La、Yb、Th、Co、Sc 和 Hf 等, 性质相对稳定, 几乎不受成岩和变质作用的影响, 对物源具有良好的指示意义 (Armstrong-Altrin *et al.*, 2004; Moradi *et al.*, 2016; 秦何星等, 2024)。一般而言, La、Th 和 Zr 更多地赋存在长英质岩石及其风化产物中, 而 Co、Sc 和 Cr 更多地赋存在铁镁质岩石及其风化产物中 (Armstrong-Altrin *et al.*, 2004)。其中, La/Th vs. Hf (Floyd and Leveridge, 1987) 和 Co/Th vs. La/Sc (Condie, 1993) 图解被广泛应用于物源的判别

(Ma *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2018)。在 La/Th vs. Hf 图解中, 羌科 1 井和胜利河西剖面夏里组碎屑岩具有较低且集中的 La/Th 值和波动较大的 Hf 含量, 分别为 2.15~3.32 和 0.96~6.29 $\mu\text{g/g}$, 大部分样品位于长英质物源区, 仅少量样品位于基性和酸性混合物源区(图 9-a)。在 Co/Th vs. La/Sc 图解中, 羌科 1 井和胜利河西剖面夏里组碎屑岩样品具有低的 Co/Th 值和 La/Sc 值, 分别为 1.04~3.37 (均值为 1.61) 和 1.56~4.33 (均值为 2.29), 全部位于长英质火山岩和安山岩之间, 反映其主要为长英质物源(图 9-b)。在 A-CN-K 图解中, 羌科 1 井及胜利河西剖面夏里组泥岩样品风化趋势与花岗闪长岩的风化趋势线基本一致(图 7), 同样表明北羌塘坳陷夏里组的物源可能是长英质岩类。另外, 在 Th/Sc vs. Zr/Sc 交汇图(图 8-b)中, 羌科 1 井及胜利河西剖面夏里组碎屑岩样品几乎全部位于成分变化的趋势线上(靠近花岗岩端元), 而远离沉积旋回趋势线, 反映其以长英质物源为特征。

稀土元素由于其稳定的地球化学性质而被广泛应用于沉积物源的示踪 (Moradi *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2018; 吴晨晓等, 2022)。通常情况下, 长英质源岩具有显著的 Eu 负异常和高的 LREE/HREE 值, 而铁镁质源岩具有不明显的 Eu 负异常和低的 LREE/HREE 值 (Roddaz *et al.*, 2006; 吴晨晓等, 2022)。但需要注意的是, 碎屑沉积岩的 Eu 异常值 (δEu) 也会受到成岩作用的影响, 进而与 δCe 和 ΣREE 之间显示显著的正相关性 (Shields and Stille, 2001; 李磊等, 2025b)。研究区夏里组碎屑岩样品 δEu 与 δCe 和 ΣREE 之间

无明显的相关性(图 5-h, 5-i), 反映碎屑岩样品 δEu 值基本不受成岩作用的影响, 而是继承于源岩。羌科 1 井和胜利河西剖面经球粒陨石标准化后的夏里组碎屑岩样品稀土元素具有显著的 Eu 负异常, 分别为 0.58~0.72 (均值为 0.62) 和 0.39~0.73 (均值为 0.63), 表明其主要为长英质物源(图 6)。另外, Allègre 等 (1978) 提出的 La/Yb vs. ΣREE 图可以有效区分沉积岩、花岗岩、碱性玄武岩和拉斑玄武岩 4 类源岩性质, 在该图解中, 所有夏里组碎屑岩样品均位于花岗岩区域, 反映其母岩主要为花岗岩等酸性岩类, 同时混入少量古老沉积岩(图 9-c)。

5.3 构造背景

沉积物的构造背景在很大程度上决定了碎屑岩的化学成分 (Bhatia and Crook, 1986; Roser and Korsch, 1988)。为了限定沉积物的构造背景, 前人提出了许多传统的判别图用于区分被动大陆边缘、活动大陆边缘、大陆岛弧和大洋岛弧等构造背景, 如 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ vs. SiO_2 、Th-Co-Zr/10 和 La-Th-Sc 图解 (Bhatia and Crook, 1986; Roser and Korsch, 1988)。然而, 这些传统的图解在构造背景判别方面成功率很低, 近年来一直被认为需谨慎使用 (Verma and Armstrong-Altrin, 2013)。

最近, Verma 和 Armstrong-Altrin (2013) 利用统计学的原理, 依据新生代沉积物主要氧化物提出了 2 个多维的判别图, 因其可以有效地区分碎屑岩沉积期碰撞、裂谷和岛弧 3 种不同的构造背景而被广泛应用 (Moradi *et al.*, 2016; Deng *et al.*, 2019)。在多维判别图中, 这些沉积物被进一步分

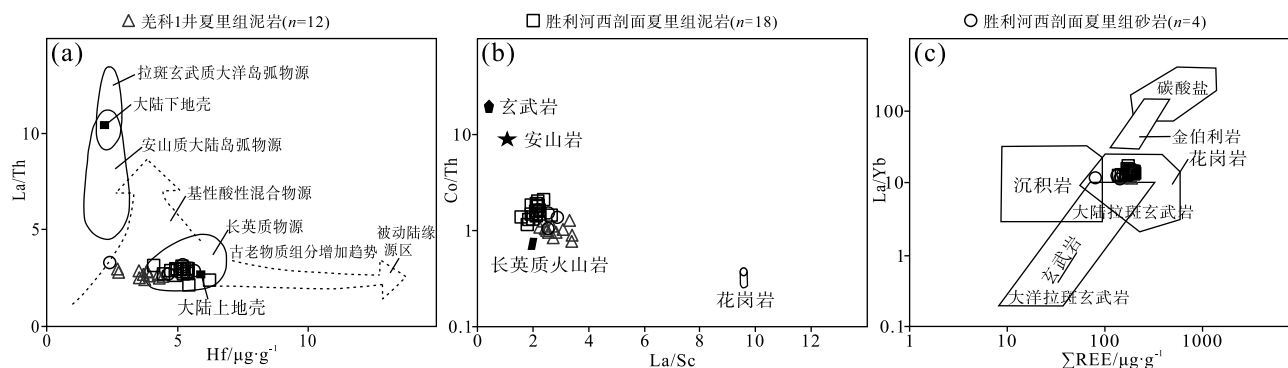


图 9 北羌塘坳陷胜利河西剖面和羌科 1 井夏里组碎屑岩物源属性判别图解
Fig. 9 Provenance discrimination diagrams for the Xiali Formation clastic rocks from Shenglihexi section and Well QK-1, North Qiangtang Depression

为高硅型 ($(\text{SiO}_2)_{\text{adj}} = 63\% \sim 95\%$) 和低硅型 ($(\text{SiO}_2)_{\text{adj}} = 35\% \sim 63\%$)，其中下标“adj”表示氧化物综合校正到 100% 的值 (忽略烧失量)，更多信息详见 Verma 和 Armstrong-Altrin (2013)。为了更精确地限定研究区夏里组碎屑岩沉积期构造背景，本研究主要采用上述 2 个多维判别图，而非传统判别图解。羌科 1 井夏里组 12 件泥页岩样品中， $(\text{SiO}_2)_{\text{adj}}$ 含量分布在 60.2%~65.4% 之间 (附表 1)，其中 4 件样品为高硅型，8 件样品为低硅型。胜利河西剖面 22 件碎屑岩样品中， $(\text{SiO}_2)_{\text{adj}}$ 含量分布在 47.9%~74.7% 之间 (附表 1)，其中 6 件样品为高硅型，16 件样品为低硅型。在高硅型和低硅型构造背景判别图 (图 10-a, 10-b) 中，研究区所有的夏里组碎屑岩样品都位于或靠近碰撞的区域中，表明北羌塘坳陷夏里组碎屑岩形成于碰撞型的构造背景下，这与北羌塘坳陷中侏罗世陆内挤压的构造体制 (李勇等, 2001; 沈安江等, 2024) 一致。

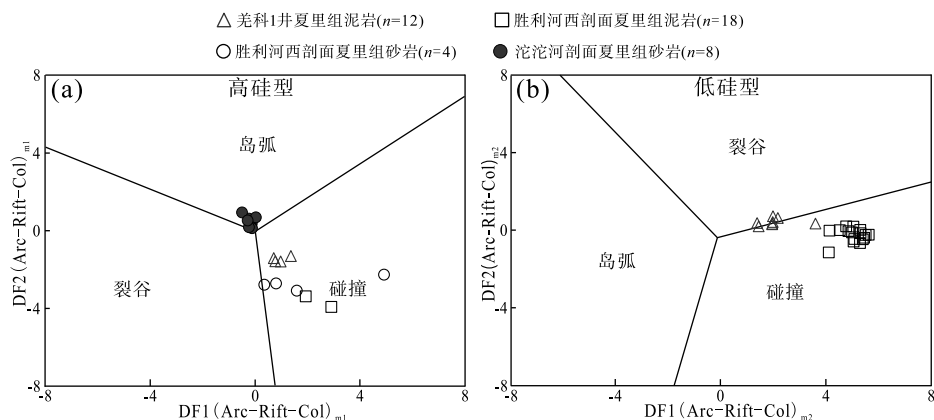
对收集的东部沱沱河地区夏里组砂岩地球化学数据 (李焕纪等, 2024) 处理分析，发现其位于岛弧区域，与中部羌科 1 井和西部胜利河地区大地构造背景存在明显的差异，这可能与安多微陆块及南羌塘发育的大量早—中侏罗世岛弧岩浆岩碎屑被搬运过东部潜伏隆起区后输入北羌塘有关 (Zhu *et al.*, 2011; Yan *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2017)。

5.4 对侏罗纪盆地演化的启示

羌塘盆地经历了多期复杂的构造演化，包括前寒武纪结晶基底形成、早古生代褶皱基底形成、晚

古生代—中生代多块体俯冲消减及碰撞造山、新生代陆内挤压隆升 (王成善等, 2001; 赵政璋等, 2001; 王剑等, 2004; 谭富文等, 2009)。其中，侏罗纪北羌塘次级盆地的演化是受龙木错—双湖和可可西里—金沙江造山带陆内挤压影响还是与班公湖—怒江特提斯洋俯冲消减有关，目前还存在争议 (李勇等, 2001; Ding *et al.*, 2013; 王剑和付修根, 2018; 王剑等, 2020; 沈安江等, 2024)。本研究在明确北羌塘坳陷中侏罗统夏里组化学风化强度、沉积物源及大地构造属性的基础上，结合区域构造演化探讨侏罗纪盆地性质及其对成盐的响应。

研究发现，羌塘地块南缘的安多微陆块出露大量早侏罗世 (约 194—173 Ma) 钙碱性中酸性侵入岩 (Zhu *et al.*, 2011; Yan *et al.*, 2016)，其与班公湖—怒江特提斯洋的俯冲及安多微陆块与南羌塘陆块拼合有关，南羌塘由被动大陆边缘转换为活动大陆边缘，自南向北发育沟—弧—盆体系 (Hu *et al.*, 2022)，同时沉积了下侏罗统曲色组 and 色哇组浅海相灰黑色泥页岩夹粉砂岩和泥灰岩。北羌塘目前暂未发现该时期岩浆记录，自下而上以沉积雀莫错组冲洪积相—河流相紫红色粗碎屑岩、潟湖—台地相膏岩—碳酸盐岩及潮坪—滨岸相含膏细碎屑岩为特征，被认为是北羌塘被动大陆边缘裂陷充填的产物 (王剑等, 2009, 2020; Wang *et al.*, 2019)，但也有观点认为是北羌塘受北侧可可西里—金沙江造山带和南侧龙木错—双湖造山带挤压影响充填的磨拉石沉积 (李勇等, 2001; Ding *et al.*, 2013; 沈安江等, 2024)。中—晚侏罗世，南羌塘



a—高硅型碎屑岩；b—低硅型碎屑岩 (Verma and Armstrong-Altrin, 2013)。沱沱河剖面夏里组砂岩数据来源于李焕纪等 (2024)

图 10 北羌塘坳陷胜利河西剖面和羌科 1 井夏里组硅质碎屑岩多维构造背景判别图

Fig. 10 Multidimensional tectonic setting discrimination diagrams for the Xiali Formation siliciclastic rocks from Shenglihexi section and Well QK-1, North Qiangtang Depression

地块自西向东出露大量中酸性岩浆岩（约 170—150 Ma），指示班公湖—怒江特提斯洋进入全面俯冲消减阶段（Li *et al.*, 2017），南羌塘大地构造属性仍为活动大陆边缘，北羌塘目前仍未发现该时期岩浆记录，沉积属性为被动大陆边缘或受造山带活化影响的弱挤压背景。班公湖—怒江特提斯洋全面俯冲消减引起盆地发生大规模海退，布曲组碳酸盐岩沉积体系消亡，进而被夏里组碎屑岩沉积体系所取代（Gao *et al.*, 2020）。北羌塘胜利河西和羌科 1 井夏里组碎屑岩沉积期大地构造属性为碰撞型，而沱沱河地区为岛弧型，说明此时北羌塘坳陷西部和中部具有碰撞挤压型构造背景，东部具有俯冲消减型背景。夏里组沉积期，南羌塘南缘班公湖—怒江特提斯洋处于全面俯冲消减阶段，北羌塘作为弧后地区应具伸展或岛弧的大地构造属性，与沱沱河地区岛弧背景一致，但胜利河西和羌科 1 井地区碰撞挤压型构造背景却与其不一致，反映该时期北羌塘坳陷中、西部地区受班公湖—怒江特提斯洋俯冲消减影响较小，仅东部受影响较大（图 11）。结合前人研究资料，笔者认为侏罗纪中期北羌塘中、西部整体为陆内弱挤压前陆盆地，其形成与南侧龙木错—双湖和北侧可可西里—金沙江造山带活化挤压有关（Ding *et al.*, 2013；沈安江等，2024），而东部可能为班公湖—怒江特提斯洋俯冲消减诱发的弧后前陆盆地。

5.5 对盆地膏盐岩形成的启示

北羌塘坳陷夏里组膏盐及含膏泥质岩分布广泛，其中羌科 1 井、向阳湖、那底岗日、托纳木、毕洛错、土门和雁石坪地区膏盐岩厚度普遍大于 40 m（王剑等，2004，2022；曾永耀等，2014；Fang *et al.*, 2016）。三元耦合成盐理论表明，稳定的构造环境、充足的物源供给及相对干旱的气候条件是规模性膏盐岩形成的必要条件（刘成林等，2010；Warren, 2010），那么羌塘盆地夏里组沉积期是否具备形成规模性膏盐岩的条件呢？

北羌塘坳陷龙尾湖地区夏里组石膏硫和锶同位素反映其盐源主要来自于同期海水（徐其辉等，2023）。侏罗纪早、中期北羌塘地区出现多次完整的海侵—海退旋回（王剑和付修根，2018），多期次海水补给为成盐提供了良好的物质来源，Sr/Ba 和 Rb/K 值是示踪古盐度的重要指标（Wei and Algeo, 2020；张妍等，2024），其中 Sr/Ba 值小于

0.2 代表淡水环境，位于 0.2~0.5 之间代表半咸水环境，大于 0.5 代表咸水环境（Wei and Algeo, 2020；周武等，2024），而 Rb/K 值小于 0.0028 时为淡水环境，位于 0.0028~0.0040 之间时为半咸水环境，大于 0.0040 时为咸水环境（张妍等，2024）。北羌塘坳陷羌科 1 井夏里组泥页岩 Sr/Ba 和 Rb/K 值分别为 0.44~1.14（仅 2 件样品略低于 0.50）和 0.0054~0.0066（均大于 0.0040）（附表 2），反映羌科 1 井夏里组沉积期整体上为咸水环境。垂向上，研究区 Sr/Ba 和 Rb/K 值均呈现出由下到上逐渐增大再逐渐减小的趋势，反映水体古盐度自下而上存在一定波动，中上部古盐度最高，为盐类形成提供了较好的物质基础。

另外，干旱气候条件有利于海水蒸发并析出盐类矿物，Sr/Cu 和 Rb/Sr 值对古气候恢复具有重要意义。Sr 为一种典型的喜干型元素，当 Sr/Cu 值在 1.3~5 之间反映温湿气候，大于 5 时指示干热气候（陈骏等，2001；张春良等，2016）；同时，高 Rb/Sr 值反映湿润气候，低 Rb/Sr 值反映干旱气候（陈骏等，2001；雷开宇等，2017）。羌科 1 井夏里组泥页岩 Sr/Cu 值为 3.23~23.7，自下而上整体呈现先增大后减小的变化趋势，Rb/Sr 值为 0.15~1.28，自下而上整体呈现先减小再增大的趋势（附表 2）。综合上述参数，认为羌科 1 井夏里组沉积期古气候自下而上经历了温暖潮湿→炎热干旱→温暖潮湿的变化。相反，胜利河西剖面泥页岩具有较高的 Rb/Sr 值（0.73~2.59，均值为 1.82）和较低的 Sr/Cu 值（0.61~3.88，均值为 2.30，不包含样品 4~28 的异常高值 11.2）（附表 2），反映了温暖潮湿的气候条件。结合地层接触关系（图 1-e, 1-f）可知，胜利河西剖面夏里组仅对应羌科 1 井上部某一层段，故其表现出温暖潮湿的气候条件。综上所述，北羌塘坳陷羌科 1 井夏里组沉积中期具备成盐的古气候条件。同时，前人在那底岗日、雁石坪地区分别根据碳酸盐岩碳、氧、锶稳定同位素和不同的酸不溶态元素比值、化学蚀变指数（CIA）、赤铁矿和针铁矿等不同的环境代用指标，约束了北羌塘不同地区夏里组沉积期古气候，得出中晚侏罗世夏里组沉积期具有干旱化的古气候条件，同时证实具有盐类形成的有利气候条件（谢渊等，2002；曾永耀等，2014；潘佳秋等，2015；Fang *et al.*, 2016）。另外，古地磁资料显示夏里组沉积期北羌

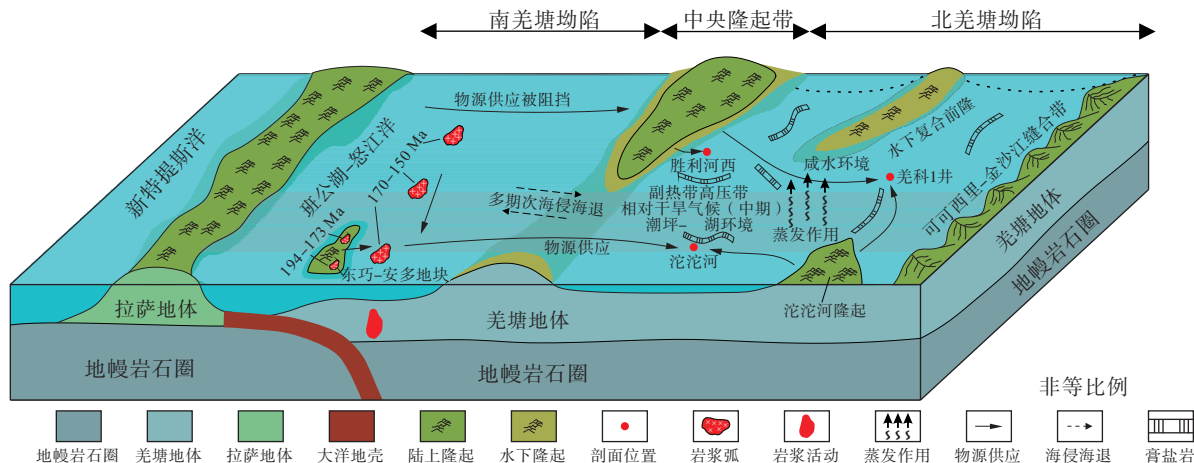


图 11 羌塘盆地中侏罗统夏里组沉积期构造演化图（非等比例）

Fig. 11 Tectonic evolution diagram of Qiangtang Basin during the deposition period of Middle Jurassic Xiali Formation (no-equal drawing)

塘地块位于北纬 24.3° ，处于北半球的副热带高压带内（程鑫等，2012；Yan *et al.*, 2016），反映北羌塘坳陷夏里组沉积期具有利于成盐的气候条件。

封闭与半封闭的古构造条件有利于盐类物质的保存。研究区夏里组形成于南侧龙木错—双湖造山带和北侧可可西里—金沙江造山带活化挤压的碰撞背景，为陆内弱挤压前陆盆地，构造相对稳定，盆地逐渐萎缩。岩相古地理资料显示夏里组沉积期北羌塘坳陷与班公湖—怒江特提斯洋不连通，除边缘发育滨岸—三角洲环境外，整体为局限的潮坪—泻湖环境（Fang *et al.*, 2016；王剑和付修根，2018；王剑等，2020），这为盐类保存创造了良好的古地理条件。

依据上述分析得到的多期次海侵—海退带来丰富的物源、相对干旱的古气候及稳定且局限的古地理条件，初步推断北羌塘坳陷具有良好的成盐条件（图 11）。

6 结论

1) 北羌塘坳陷胜利河西和美科 1 井地区夏里组碎屑岩化学风化指数 (CIA) 受颗粒大小与分选性影响较大，但基本不受沉积旋回的影响，故泥页岩样品的 CIA 值能够较真实地反映物源区的化学风化强度。美科 1 井夏里组泥页岩 CIA 值波动较大 (60~77)，基本不受钾交代作用影响，表明美科 1 井夏里组物源区总体上经历了中等—弱的化学风化作用。胜利河西剖面夏里组泥页岩样品的 CIA 值

为 73~75，受钾交代作用影响较大，经钾校正后的泥页岩样品 CIA 值 (CIA_{corr}) 为 80~85，表明胜利河西剖面夏里组物源区经历了强烈的化学风化作用。

2) 综合 La/Th vs. Hf、Co/Th vs. La/Sc、La/Yb vs. ΣREE 及 A-CN-K 等判别图解，认为北羌塘坳陷夏里组碎屑岩主要来自长英质物源，同时可能混有少量安山质物源和古老的沉积岩物源。球粒陨石标准化后显示夏里组碎屑岩具有显著的 Eu 负异常 (0.39~0.73)，该异常值主要继承于长英质的源岩，而非成岩作用的影响。

3) 北羌塘坳陷西部胜利河和中部美科 1 井地区夏里组碎屑岩主体形成于碰撞型构造背景，而东部沱沱河地区夏里组主体形成于岛弧构造背景，这与北羌塘坳陷侏罗纪中期的构造体制一致。侏罗纪中期北羌塘中、西部为陆内弱挤压前陆盆地，而东部可能为班公湖—怒江新特提斯洋俯冲消减诱发的弧后前陆盆地。侏罗纪早、中期北羌塘地区多期次海侵—海退、相对干旱的古气候条件及稳定且局限的古地理条件为夏里组膏盐岩形成奠定了有利条件。

附加文件：附表 1 至附表 3 见古地理论网站 (www.gdlib.cn) 或中国知网 (www.cnki.net) 中该文的附加文件。

参考文献 (References)

- 陈骏, 汪永进, 陈旸, 刘连文, 季峻峰, 鹿化煜. 2001. 中国黄土层 Rb 和 Sr 地球化学特征及其古季风气候意义. 地质学报, 75(2): 259-266. [Chen J, Wang Y J, Chen Y, Liu L W, Ji J F, Lu H Y.

2001. Rb and Sr geochemical characterization of the Chinese loess and its implications for palaeomonsoon climate. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 259–266]
- 程鑫, 吴汉宁, 刁宗宝, 王海军, 张晓东, 马轮, 周亚楠, 康伟伟, 计文化, 李荣社, 陈守建, 赵振明. 2012. 羌北地块中一晚侏罗世雁石坪群古地磁新结果. *地球物理学报*, 55(10): 3399–3409. [Cheng X, Wu H N, Diao Z B, Wang H J, Zhang X D, Ma L, Zhou Y N, Kang W W, Ji W H, Li R S, Chen S J, Zhao Z M. 2012. New paleomagnetic result of the Middle–Late Jurassic rocks from northern Qiangtang Block, west China. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(10): 3399–3409]
- 冯连君, 储雪青, 张启锐, 张同钢. 2003. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用. *地学前缘*, 10(4): 539–544. [Feng L J, Chu X L, Zhang Q R, Zhang T G. 2003. CIA(chemical index of alteration) and its applications in the Neoproterozoic elastic rocks. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 539–544]
- 雷开宇, 刘池洋, 张龙, 吴柏林, 寸小妮, 孙莉. 2017. 鄂尔多斯盆地北部侏罗系泥岩地球化学特征: 物源与古沉积环境恢复. *沉积学报*, 35(3): 621–636. [Lei K Y, Liu C Y, Zhang L, Wu B L, Cun X N, Sun L. 2017. Element geochemical characteristics of the Jurassic mudstones in the northern Ordos Basin; implications for tracing sediment sources and paleoenvironment restoration. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(3): 621–636]
- 李才, 翟庆国, 董永胜, 曾庆高, 黄小鹏. 2007. 青藏高原龙木错—双湖板块缝合带与羌塘古特提斯洋演化记录. *地质通报*, 26(1): 13–21. [Li C, Zhai Q G, Dong Y S, Zeng Q G, Huang X P. 2007. Lungmu Co-Shanghu plate suture in the Qinghai-Tibet Plateau and records of the evolution of the Paleo-Tethys Ocean in the Qiangtang area, Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 26(1): 13–21]
- 李焕纪, 孙永刚, 郑近龙, 董峻麟, 张徐平. 2024. 青海沱沱河地区夏里组砂岩形成时代及物源区构造环境判别. *世界核地质科学*, 41(5): 875–887. [Li H J, Sun Y G, Zheng J L, Dong J L, Zhang X P. 2024. Geochronology and tectonic environment of the provenance for Xiali Formation sandstone in Tuotuohe area, Qinghai Province. *World Nuclear Geoscience*, 41(5): 875–887]
- 李磊, 王忠伟, 王剑, 隋博雨, 戚俊. 2025a. 北羌塘坳陷西南缘中侏罗统夏里组泥页岩地球化学特征与沉积古环境分析. *地球化学*, 54(4): 626–643. [Li L, Wang Z W, Wang J, Sui B Y, Qi J. 2025a. Characteristics of mudstones and paleoenvironmental analysis of the Middle Jurassic Xiali Formation in the Southwestern margin of the Northern Qiangtang Depression. *Geochimica*, 54(4): 626–643]
- 李磊, 王忠伟, 王剑, 宋春彦, 占王忠, 李王鹏, 隋博雨, 戚俊. 2025b. 羌塘盆地中部下二叠统展金组海相细粒沉积岩古环境与有机质富集机制. *地质论评*, 70(2): 1–18. [Li L, Wang Z W, Wang J, Song C Y, Zhan W Z, Li W P, Sui B Y, Qi J. 2025b. Paleoenvironment and organic matter enrichment mechanism of marine fine-grained sedimentary rocks in the Lower Permian Zhanjin Formation in central Qiangtang Basin. *Geological Review*, 70(2): 1–18]
- 李亚林, 王成善, 李永铁. 2008. 西藏羌塘盆地侏罗系膏盐岩与油气成藏. *石油学报*, 29(2): 173–178. [Li Y L, Wang C S, Li Y T. 2008. Characteristics of the Jurassic saline deposits and its significance to hydrocarbon accumulation in Qiangtang Basin of Tibet area. *Acta Petrolei Sinica*, 29(2): 173–178]
- 李勇, 王成善, 伊海生, 石和, 林金辉, 朱利东, 李祥辉. 2001. 青藏高原中侏罗世—早白垩世羌塘复合型前陆盆地充填模式. *沉积学报*, 19(1): 20–27. [Li Y, Wang C S, Yi H S, Shi H, Lin J H, Zhu L D, Li X H. 2001. Fill models of in the Qiangtang composite foreland basin in Qinghai-Xizang plateau, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 19(1): 20–27]
- 刘成林, 焦鹏程, 王弭力. 2010. 盆地钾盐找矿模型探讨. *矿床地质*, 29(4): 581–592. [Liu C L, Jiao P C, Wang M L. 2010. A tentative discussion on exploration model for potash deposits in basins of China. *Mineral Deposits*, 29(4): 581–592]
- 潘佳秋, 宋春晖, 鲍晶, 马丽芳, 颜茂都, 方小敏, 应红, 杨一博. 2015. 羌塘盆地侏罗系元素地球化学特征与成盐层位分析. *地质学报*, 89(11): 2152–2160. [Pan J Q, Song C H, Bao J, Ma L F, Yan M D, Fang X M, Ying H, Yang Y B. 2015. Geochemical characteristics and salt-forming analysis of Jurassic strata in the Qiangtang Basin. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 2152–2160]
- 秦何星, 陈雷, 卢畅, 胡月, 熊敏, 谭秀成, 计玉冰, 陈鑫, 王高翔. 2024. 上扬子南缘五峰组—龙马溪组页岩地球化学特征及其对风化、物源与构造背景的指示. *地质论评*, 70(4): 1314–1334. [Qin H X, Chen L, Lu C, Hu Y, Xiong M, Tan X C, Ji Y B, Chen X, Wang G X. 2024. Geochemical characteristics of the Wufeng–Longmaxi Formations shale in the southern margin of the upper Yangtze area: implications for weathering, provenance and tectonic setting. *Geological Review*, 70(4): 1314–1334]
- 沈安江, 熊绍云, 胡安平, 张建勇, 许强, 付小东, 潘立银, 王鑫, 刘思琪, 李茜, 段军茂. 2024. 羌塘盆地中生代岩相古地理研究新进展. *海相油气地质*, 29(1): 30–44. [Shen A J, Xiong S Y, Hu A P, Zhang J Y, Xu Q, Fu X D, Pan L Y, Wang X, Liu S Q, Li Q, Duan J M. 2024. New progress in the study of Mesozoic lithofacies and paleogeography in Qiangtang Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 29(1): 30–44]
- 谭富文, 王剑, 王小龙, 杜佰伟. 2002. 西藏羌塘盆地—中国油气资源战略选区的首选目标. *沉积与特提斯地质*, 22(1): 16–21. [Tan F W, Wang J, Wang X L, Du B W. 2002. The Qiangtang Basin in Xizang as the target area for the oil and gas resources in China. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 22(1): 16–21]
- 谭富文, 王剑, 付修根, 陈明, 杜佰伟. 2009. 藏北羌塘盆地基底变质岩的锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义. *岩石学报*, 25(1): 139–146. [Tan F W, Wang J, Fu X G, Chen M, Du B W. 2009. U-Pb zircon SHRIMP age of metamorphic rocks from the basement of the Qiangtang Basin, northern Tibet, and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 139–146]
- 王成善, 伊海生, 李勇, 邓斌. 2001. 羌塘盆地地质演化与油气远景评价. 北京: 地质出版社, 1–249. [Wang C S, Yi H S, Li Y, Deng B. 2001. The Geological Evolution and Prospective Oil and Gas Assessment of the Qiangtang Basin in Northern Tibetan Plateau. Beijing: Geological Publishing House, 1–249]

- 王剑, 谭富文, 李亚林, 李永铁, 陈明, 王成善, 郭祖军, 王小龙, 杜佰伟, 朱忠发. 2004. 青藏高原重点沉积盆地油气资源潜力分析. 北京: 地质出版社, 1-334. [Wang J, Tan F W, Li Y L, Li Y T, Chen M, Wang C S, Guo Z J, Wang X L, Du B W, Zhu Z F. 2004. The Potential of the Oil and Gas Resources in Major Sedimentary Basins on the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. Beijing: Geological Publishing House, 1-334]
- 王剑, 丁俊, 王成善, 谭富文, 陈明, 胡平. 2009. 青藏高原油气资源战略选区调查与评价. 北京: 地质出版社, 1-645. [Wang J, Ding J, Wang C S, Tan F W. 2009. Investigation and Evaluation of the Qinghai-Tibet Plateau Oil and Gas Resources Strategy Constituency. Beijing: Geological Publishing House, 1-645]
- 王剑, 付修根. 2018. 论羌塘盆地沉积演化. 中国地质, 45(2): 237-259. [Wang J, Fu X G. 2018. Sedimentary evolution of the Qiangtang Basin. *Geology in China*, 45(2): 237-259]
- 王剑, 付修根, 沈利军, 谭富文, 宋春彦, 陈文彬. 2020. 论羌塘盆地油气勘探前景. 地质论评, 66(5): 1091-1113. [Wang J, Fu X G, Shen L J, Tan F W, Song C Y, Chen W B. 2020. Prospect of the potential of oil and gas resources in Qiangtang Basin, Xizang (Tibet). *Geological Review*, 66(5): 1091-1113]
- 王剑, 王忠伟, 付修根, 宋春彦, 谭富文, 韦恒叶. 2022. 青藏高原羌塘盆地首口油气科探井(QK-1)新发现. 科学通报, 67(3): 321-328. [Wang J, Wang Z W, Fu X G, Song C Y, Tan F W, Wei H Y. 2022. New discoveries on the first petroleum scientific drilling(QK-1) of the Qiangtang Basin, Tibetan plateau. *Chinese Science Bulletin*, 67(3): 321-328]
- 吴晨晓, 姚宗全, 德勒恰提·加娜塔依, 邓高山, 李天明, 赫佳, 刘宇, 王小红, 曙格拉·马哈西. 2022. 准噶尔盆地沙湾凹陷西斜坡二叠系佳木河组物源区构造背景分析. 古地理学报, 24(6): 1149-1161. [Wu C X, Yao Z Q, Deleqtiati J, Deng G S, Li T M, He J, Liu Y, Wang X H, Sugela M. 2022. Tectonic setting analysis of provenance area of the Permian Jiamuhe Formation on western slope of Shawan sag, Junggar Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 24(6): 1149-1161]
- 吴珍汉, 高锐, 卢占武, 叶培盛, 陆露, 殷裁云. 2014. 羌塘盆地结构构造与油气勘探方向. 地质学报, 88(6): 1130-1144. [Wu Z H, Gao R, Lu Z W, Ye P S, Lu L, Yin C Y. 2014. Structures of the Qiangtang Basin and its significance to oil-gas exploration. *Acta Geologica Sinica*, 88(6): 1130-1144]
- 夏国清, 伊海生, 黄华谷, 武向峰, 惠博. 2010. 藏北雁石坪地区夏里组米级沉积旋回及成因. 成都理工大学学报(自然科学版), 37(2): 133-139. [Xia G Q, Yi H S, Huang H G, Wu X F, Hui B. 2010. Meter-scale sedimentary cycles and their possible genetic mechanism of Middle Jurassic Xiali Formation in Yanshiping area, North Tibet, China. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 37(2): 133-139]
- 谢渊, 王剑, 刘家铎, 罗建宁, 张哨楠, 杨宝星, 李明辉. 2002. 羌塘盆地那底岗日地区中侏罗世层序地层与碳、氧、锶同位素响应. 沉积学报, 20(2): 188-196. [Xie Y, Wang J, Liu J D, Luo J N, Zhang S N, Yang B X, Li M H. 2002. Carbon, oxygen and strontium isotopic responses of carbonate rocks and the Middle Jurassic sequence stratigraphy in the Nadigangri area, Qiangtang Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(2): 188-196]
- 熊盛青, 周道卿, 曹宝宝, 赵睿, 魏岩岩, 胡悦, 肖梦楚, 段宏伟, 胡夏炜, 郑宇舟. 2020. 羌塘盆地中央隆起带的重磁场证据及其构造意义. 地球物理学报, 63(9): 3491-3504. [Xiong S Q, Zhou D Q, Cao B B, Zhao R, Wei Y Y, Hu Y, Xiao M C, Duan H W, Hu X W, Zheng Y Z. 2020. Characteristics of the central uplift zone in Qiangtang Basin and its tectonic implications: evidences from airborne gravity and magnetic data. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(9): 3491-3504]
- 徐其辉, 苗忠英, 娄鹏程, 郑绵平, 陈文西. 2023. 北羌塘坳陷中侏罗统夏里组蒸发岩硫同位素特征及其钾盐成矿意义. 矿床地质, 42(2): 366-380. [Xu Q H, Miao Z Y, Lou P C, Zheng M P, Chen W X. 2023. Sulfur isotope characteristics of evaporite and its metallogenetic significance of potassium salts from Middle Jurassic Xiali Formation in North Qiangtang depression. *Mineral Deposits*, 42(2): 366-380]
- 徐小涛, 邵龙义. 2018. 利用泥质岩化学蚀变指数分析物源区风化程度时的限制因素. 古地理学报, 20(3): 515-522. [Xu X T, Shao L Y. 2018. Limiting factors in utilization of chemical index of alteration of mudstones to quantify the degree of weathering in provenance. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 20(3): 515-522]
- 曾永耀, 潘佳秋, 马丽芳, 鲍晶, 宋春晖, 杨积伟. 2014. 羌塘盆地中一晚侏罗世夏里期气候演化特征及其成盐意义. 矿床地质, 33(5): 993-1002. [Zeng Y Y, Pan J Q, Ma L F, Bao J, Song C H, Yang J W. 2014. Palaeoclimatic evolution of Qiangtang Basin during Middle-Late Jurassic Xiali period and its salt-forming significance. *Mineral Deposits*, 33(5): 993-1002]
- 张春良, 沈玉林, 秦勇, 赵志刚, 谢国梁, 郑俊. 2016. 崖南凹陷Y1井崖城组泥岩微量元素特征及地质意义. 高校地质学报, 22(3): 512-518. [Zhang C L, Shen Y L, Qin Y, Zhao Z G, Xie G L, Zheng J. 2016. Distribution characteristics and geological significance of trace elements of mudstone of the Yacheng Formation, Well Y1, in Ya'nian Sag, Qiongdongnan Basin. *Geological Journal of China Universities*, 22(3): 512-518]
- 张妍, 吴欣松, 康积伦, 高岗, 黄志龙, 樊柯廷, 李杰, 马强, 张伟. 2024. 准东吉南凹陷二叠系芦草沟组烃源岩有机质富集机制. 天然气地球科学, 35(9): 1574-1589. [Zhang Y, Wu X S, Kang J L, Gao G, Huang Z L, Fan K T, Li J, Ma Q, Zhang W. 2024. Mechanism of organic matter enrichment in the Permian Lucaogou Formation, Ji'nian Sag, eastern Junggar Basin. *Natural Gas Geoscience*, 35(9): 1574-1589]
- 赵政璋, 李永铁, 叶和飞, 张昱文. 2001. 青藏高原大地构造特征及盆地演化. 北京: 科学出版社, 1-439. [Zhao Z Z, Li Y T, Ye H F, Zhang Y W. 2001. Tectonic Characteristics and Basin Evolution of the Qinghai-Tibet Plateau. Beijing: Science Press, 1-439]
- 郑绵平, 齐文, 张永生. 2006. 中国钾盐地质资源现状与找钾方向初步分析. 地质通报, 25(11): 1239-1246. [Zheng M P, Qi W, Zhang Y S. 2006. Present situation of potash resources and direction

- of potash search in China. *Geological Bulletin of China*, 25(11): 1239–1246]
- 周道卿, 曹宝宝, 赵睿, 胡悦, 魏岩岩, 肖梦楚, 段宏伟, 胡夏炜, 郑宇舟. 2021. 羌塘盆地高精度航空重磁调查对盆地基底性质与构造格局的启示. *地质学报*, 95(11): 3178–3191. [Zhou D Q, Cao B B, Zhao R, Hu Y, Wei Y Y, Xiao M C, Duan H W, Hu X W, Zheng Y Z. 2021. High-precision airborne gravity and magnetic survey analysis of the Qiangtang Basin: implications for basin basement properties and tectonic framework. *Acta Geologica Sinica*, 95(11): 3178–3191]
- 周武, 韩雪, 龙宇, 岳龙, 徐安全, 陈仁. 2024. 黔中金沙地区早石炭世九架炉组地质特征及沉积环境讨论. *华东地质*, 45(2): 187–197. [Zhou W, Han X, Long Y, Yue L, Xu A Q, Chen R. 2024. Discussion on the geological features and sedimentary environment of the Early Carboniferous Jiujialu Formation in Jinsha area of central Guizhou. *East China Geology*, 45(2): 187–197]
- Allègre C J, Minster J F. 1978. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 38(1): 1–25.
- Armstrong-Altrin J S, Lee Y I, Verma S P, Ramasamy S. 2004. Geochemistry of sandstones from the upper Miocene Kudankulam Formation, southern India: implications for provenance, weathering, and tectonic setting. *Journal of Sedimentary Research*, 74(2): 285–297.
- Armstrong-Altrin J S, Lee Y I, Kasper-Zubillaga J J, Carranza-Edwards A. 2012. Geochemistry of beach sands along the Western Gulf of Mexico, Mexico: implication for provenance. *Chemie Der Erde-Geochemistry*, 72(4): 345–362.
- Armstrong-Altrin J S, Machain-Castillo M L, Rosales-Hoz L, Carranza-Edwards A, Sanchez-Cabeza J A, Ruiz-Fernández A C. 2015. Provenance and depositional history of continental slope sediments in the Southwestern Gulf of Mexico unraveled by geochemical analysis. *Continental Shelf Research*, 95: 15–26.
- Bhatia M R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *Journal of Geology*, 91: 611–627.
- Bhatia M R, Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of greywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92: 181–193.
- Condie K C. 1993. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: Contrasting results from surface samples and shales. *Chemical Geology*, 104(1): 1–37.
- Cox R, Lowe D R, Cullers R L. 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(14): 2919–2940.
- Deng T, Li Y, Wang Z J, Yu Q, Dong S L, Yan L, Hu W C, Chen B. 2019. Geochemical characteristics and organic matter enrichment mechanism of black shale in the Upper Triassic Xujiahe Formation in the Sichuan basin: implications for paleoweathering, provenance and tectonic setting. *Marine and Petroleum Geology*, 109: 698–716.
- Ding L, Yang D, Cai F L, Pullen A, Kapp P, Gehrels G E, Zhang L Y, Zhang Q H, Lai Q Z, Yue Y H, Shi R D. 2013. Provenance analysis of the Mesozoic Hoh-Xil-Songpan-Ganzi turbidites in northern Tibet: implications for the tectonic evolution of the eastern Paleo-Tethys Ocean. *Tectonics*, 32(1): 34–48.
- Fang X M, Song C H, Yan M D, Zan J B, Liu C L, Sha J G, Zhang W L, Zeng Y Y, Wu S, Zhang D W. 2016. Mesozoic litho- and magnetostratigraphic evidence from the central Tibetan Plateau for megamonsoon evolution and potential evaporites. *Gondwana Research*, 37(1): 110–129.
- Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23(10): 921–924.
- Floyd P A, Leveridge B E. 1987. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones. *Journal of the Geological Society*, 144(4): 531–542.
- Gao Y, Fu X G, Li Y, Wan Y L, Wang Z W, Song C Y, Shen H L, Lin F. 2020. Demise of the Middle Jurassic carbonate platform: responses to sea-level fall in the Qiangtang Basin, eastern Tethys. *Geological Journal*, 55(12): 7935–7952.
- Guo Y L, Yang S Y, Su N, Li C, Yin P, Wang Z B. 2018. Revisiting the effects of hydrodynamic sorting and sedimentary recycling on chemical weathering indices. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 227(1): 48–63.
- Herron M M. 1988. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *Journal of Sedimentary Petrology*, 58: 820–829.
- Hessler A M, Zhang J Y, Covault J, Ambrose W. 2017. Continental weathering coupled to Paleogene climate changes in North America. *Geology*, 45(10): 911–914.
- Hu X M, Ma A L, Xue W W, Garzanti E, Cao Y, Li S M, Sun G Y, Lai W. 2022. Exploring a lost ocean in the Tibetan Plateau: birth, growth, and demise of the Bangong-Nujiang Ocean. *Earth-Science Reviews*, 229: 104031.
- Kapp P, Yin A, Manning C E, Harrison T M, Taylor M H, Ding L. 2003. Tectonic evolution of the early Mesozoic blueschist-bearing Qiangtang metamorphic belt, central Tibet. *Tectonics*, 22(4): 17.
- Korsch R J. 1993. Geochemical, petrographic and grain-size variations within single turbidite beds. *Sedimentary Geology*, 83(1): 15–35.
- Li S, Ding L, Guilmette C, Fu J J, Xu Q, Yue Y H, Pinto R H. 2017. The subduction-accretion history of the Bangong-Nujiang Ocean: constraints from provenance and geochronology of the Mesozoic strata near Gaize, central Tibet. *Tectonophysics*, 702: 42–60.
- Ma P F, Wang L C, Wang C S, Wu X H, Wei Y S. 2015. Organic-matter accumulation of the lacustrine Lunpola oil shale, central Tibetan Plateau: controlled by the paleoclimate, provenance, and drainage system. *International Journal of Coal Geology*, 147–148: 58–70.
- McLennan S M. 1993. Weathering and global denudation. *The Journal of*

- Geology, 101: 295–303.
- McLennan S M, Hemming S, McDaniell D K, Hanson G N. 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. Geological Society of America Special Papers, 284: 21–40.
- Moradi A V, Sari A, Akkaya P. 2016. Geochemistry of the Miocene oil shale (Hançili Formation) in the Çankırı–Çorum Basin, Central Turkey: implications for paleoclimate conditions, source area weathering, provenance and tectonic setting. Sedimentary Geology, 341: 289–303.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. Nature, 299: 715–717.
- Price J R, Velbel M A. 2003. Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. Chemical Geology, 202: 397–416.
- Rieu R, Allen P A, Plötze M, Pettke T. 2007. Climatic cycles during a Neoproterozoic “snowball” glacial epoch. Geology, 35(4): 299–302.
- Roddaz M, Viers J, Brusset S, Baby P, Boucayrand C, Hérail G. 2006. Controls on weathering and provenance in the Amazonian foreland basin: insights from major and trace element geochemistry of Neogene Amazonian sediments. Chemical Geology, 226(1): 31–65.
- Roser B P, Korsch R J. 1988. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major element data. Chemical Geology, 67(1–2): 119–139.
- Ross D J K, Bustin R M. 2009. Investigating the use of sedimentary geochemical proxies for paleoenvironment interpretation of thermally mature organic-rich strata: examples from the Devonian-Mississippian shales, Western Canadian Sedimentary Basin. Chemical Geology, 260(1–2): 1–19.
- Roy D K, Roser B P. 2013. Climatic control on the composition of Carboniferous-Permian Gondwana sediments, Khalaspir Basin, Bangladesh. Gondwana Research, 23(3): 1163–1171.
- Rudnick R L, Gao S. 2003. Composition of the continental crust. In: Treatise on Geochemistry. UK: Pergamon, 1–64.
- Shields G, Stille P. 2001. Diagenetic constraints on the use of cerium anomalies as palaeoseawater redox proxies: an isotopic and REE study of Cambrian phosphorites. Chemical Geology, 175(1): 29–48.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. The continental crust: its composition and evolution. The Journal of Geology, 94(4): 57–72.
- Verma S P, Armstrong-Altrin J S. 2013. New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Precambrian basins. Chemical Geology, 355: 117–133.
- Warren J K. 2010. Evaporites through time: tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits. Earth-Science Reviews, 98(3–4): 217–268.
- Wang Z W, Wang J, Fu X G, Zhan W Z, Armstrong-Altrin J S, Yu F, Feng X L, Song C Y, Zeng S Q. 2018. Geochemistry of the Upper Triassic black mudstones in the Qiangtang Basin, Tibet: implications for paleoenvironment, provenance, and tectonic setting. Journal of Asian Earth Sciences, 160: 118–135.
- Wang Z W, Wang J, Fu X G, Feng X L, Armstrong-Altrin J S, Zhan W Z, Wan Y L, Song C Y, Ma L, Shen L J. 2019. Sedimentary successions and onset of the Mesozoic Qiangtang rift basin (northern Tibet), Southwest China: insights on the Paleo- and Meso-Tethys evolution. Marine and Petroleum Geology, 102: 657–679.
- Wang Z W, Zhan W Z, Wang J, Peng Q H, Wei W, Wang D, Ma Q L, Song C Y, Feng X L. 2023. Geochemistry and zircon geochronology of the Late Triassic volcanic-sedimentary successions in northern Tibet: implications for the provenance and tectonic evolution of the Mesozoic Qiangtang Basin. Gondwana Research, 117: 321–343.
- Wei W, Algeo T J. 2020. Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks. Geochimica et Cosmochimica Acta, 287: 341–366.
- Yan D T, Chen D Z, Wang Q C, Wang J G. 2010. Large-scale climatic fluctuations in the latest Ordovician on the Yangtze block, South China. Geology, 38(7): 599–602.
- Yan M D, Zhang D W, Fang X M, Ren H D, Zhang W L, Zan J B, Song C H, Zhang T. 2016. Paleomagnetic data bearing on the Mesozoic deformation of the Qiangtang block: implications for the evolution of the Paleo- and Meso-Tethys. Gondwana Research, 39(1): 292–316.
- Yang J H, Cawood P A, Du Y S, Li W Q, Yan J X. 2016. Reconstructing Early Permian tropical climates from chemical weathering indices. Geological Society of America Bulletin, 128(5): 739–751.
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, Dilek Y, Mo X X. 2011. Lhasa terrane in southern Tibet came from Australia. Geology, 39(8): 727–730.

(责任编辑 张西娟)

附表 1 北羌塘坳陷胜利河西剖面和美科 1 井夏里组样品主量元素含量 (%) 及相关元素比值

剖面		Appendix 1 Major elements abundances (%) and associated ratios of the Xiali Formation samples from Shenglihexi section and Well QK-1, North Qiangtang Depression																	高硅型			
		岩性	SiO ₂ (SiO ₂) _{adj}	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ^T	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	烧失量	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ^T /K ₂ O	CIA	CIA _{corr}	ICV	低硅型		高硅型	
																			DF1	DF2	DF1	DF2
美科 1 井	QK1-73	泥岩	57.0	62.2	18.2	5.07	2.05	4.19	0.45	3.79	0.04	0.73	8.36	3.13	1.34	77	77	0.83	3.60	0.35	—	—
	QK1-158	泥岩	53.4	61.2	12.7	4.57	1.96	10.4	0.94	2.51	0.08	0.59	12.8	4.21	1.82	69	69	1.15	1.95	0.34	—	—
	QK1-210	泥岩	55.0	60.6	16.4	6.14	2.44	5.60	0.95	3.23	0.06	0.69	9.33	3.34	1.90	71	71	1.08	2.17	0.63	—	—
	QK1-271	泥岩	59.3	63.7	17.3	6.04	2.28	2.60	1.20	3.54	0.05	0.72	6.85	3.43	1.71	69	69	1.07	—	—	0.70	-1.38
	QK1-411	泥岩	56.2	61.8	15.9	6.39	2.09	4.94	1.11	3.44	0.07	0.66	9.10	3.53	1.86	68	68	1.12	1.98	0.73	—	—
	QK1-467	泥岩	57.7	63.6	13.4	5.42	2.28	7.00	1.25	2.82	0.11	0.63	9.30	4.32	1.92	65	65	1.30	—	—	1.35	-1.28
	QK1-558	泥岩	58.6	65.4	11.7	4.00	1.93	8.82	1.41	2.40	0.07	0.57	10.4	5.02	1.67	62	62	1.33	—	—	0.96	-1.55
	QK1-663	泥岩	56.2	61.8	15.4	5.52	2.05	6.22	1.14	3.53	0.09	0.66	9.07	3.65	1.56	67	67	1.12	1.95	0.31	—	—
	QK1-751	泥岩	56.9	64.4	11.1	3.61	1.78	10.4	1.59	2.11	0.06	0.62	11.5	5.11	1.71	60	60	1.37	—	—	0.75	-1.54
	QK1-843	泥岩	57.5	62.8	15.4	5.82	2.16	5.45	1.36	3.03	0.09	0.69	8.20	3.74	1.92	66	66	1.17	1.38	0.37	—	—
胜利河西剖面	QK1-951	泥岩	55.7	60.6	17.1	6.75	2.68	3.96	1.32	3.31	0.09	0.75	8.14	3.25	2.04	68	68	1.18	1.43	0.21	—	—
	QK1-1047	泥岩	55.2	60.2	18.6	7.10	2.39	2.96	0.97	3.64	0.07	0.71	8.19	2.98	1.95	72	72	1.01	1.97	0.43	—	—
	4-6B	砂质灰岩	36.4	48.7	3.10	2.57	0.88	30.3	0.10	0.83	0.06	0.29	25.3	11.73	3.10	72	72	1.80	—	—	—	—
	4-1*	泥岩	57.1	63.5	13.8	5.62	3.12	4.96	0.31	3.50	0.04	1.25	9.77	4.14	1.61	74	82	1.30	—	—	2.89	-3.88
	4-4*	泥岩	57.1	62.7	15.9	6.82	3.20	2.26	0.34	4.08	0.04	1.23	8.55	3.59	1.67	74	82	1.24	4.77	0.20	—	—
	4-5*	泥岩	57.0	62.8	15.3	6.72	3.10	2.94	0.29	4.03	0.04	1.13	8.78	3.73	1.67	74	83	1.24	5.04	0.20	—	—
	4-7*	泥岩	58.9	64.6	14.5	6.45	3.02	2.86	0.44	3.63	0.03	1.19	8.50	4.06	1.78	73	80	1.29	—	—	1.92	-3.34
	4-8*	泥岩	56.2	61.6	17.0	6.79	3.37	1.97	0.21	4.46	0.03	1.15	8.64	3.31	1.52	75	85	1.18	5.51	-0.24	—	—
	4-9*	泥岩	56.8	62.8	16.0	6.56	3.10	2.22	0.25	4.19	0.03	1.15	9.18	3.55	1.57	75	84	1.19	5.30	0.03	—	—
	4-10*	泥岩	55.2	61.5	16.6	6.83	3.15	2.02	0.20	4.51	0.03	1.13	9.37	3.33	1.51	75	85	1.17	5.62	-0.22	—	—
胜利河西剖面	4-11*	泥岩	51.3	58.3	14.5	6.27	3.32	7.32	0.26	3.80	0.05	1.10	11.6	3.54	1.65	74	83	1.30	5.08	-0.44	—	—
	4-13*	泥岩	47.1	55.1	13.3	5.61	3.10	11.3	0.22	3.60	0.06	1.03	14.1	3.54	1.56	74	84	1.32	5.29	-0.65	—	—
	4-10B	砂岩	59.7	70.0	4.50	3.87	4.99	9.82	0.37	1.15	0.16	0.67	14.5	13.26	3.36	65	65	4.17	—	—	4.89	-2.22
	4-14*	泥岩	56.2	61.7	15.7	7.07	3.38	2.85	0.25	4.15	0.04	1.29	8.60	3.58	1.70	75	84	1.28	5.31	-0.14	—	—
	4-16*	泥岩	57.0	62.3	16.2	6.27	3.40	2.60	0.23	4.34	0.04	1.22	8.54	3.52	1.44	75	84	1.22	5.40	-0.46	—	—
	4-18*	泥岩	57.0	62.2	15.7	6.75	3.46	2.91	0.33	4.04	0.04	1.30	8.26	3.63	1.67	74	83	1.29	4.86	-0.04	—	—

续表 1

剖面	编号	岩性	SiO ₂ (SiO ₂) _{adj}	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ^T	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	烧失量	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ^T /K ₂ O	CIA _{corr}	ICV	低硅型		高硅型	
																		DF1	DF2	DF1	DF2
胜利河剖面	4-20*	泥岩	55.0	61.3	14.3	6.61	3.22	5.04	0.30	3.81	0.05	1.29	9.54	3.85	1.73	82	1.35	4.99	-0.11	—	—
	4-22*	泥岩	54.8	60.8	15.2	6.67	3.33	4.49	0.22	4.06	0.05	1.20	9.30	3.61	1.64	75	1.28	5.45	-0.38	—	—
	4-24*	泥岩	55.6	61.4	15.1	6.64	3.31	4.10	0.39	3.87	0.05	1.27	9.14	3.68	1.72	73	1.31	4.52	0.01	—	—
	4-26	泥岩	46.9	55.1	14.6	7.61	3.07	7.78	0.24	3.95	0.06	0.92	11.0	3.22	1.93	74	1.30	5.05	-0.58	—	—
	4-12B	砂岩	58.6	67.0	9.3	4.34	2.03	9.23	0.68	2.21	0.07	0.15	10.6	6.30	1.97	67	1.49	—	—	1.57	-3.06
	4-28	泥岩	39.2	47.9	11.9	5.66	3.29	17.6	0.29	2.85	0.10	0.12	17.6	3.30	1.99	75	1.45	4.11	-1.13	—	—
	4-14B	砂质灰岩	23.8	34.8	2.85	1.48	1.18	37.6	0.44	0.48	0.19	0.28	30.4	8.35	3.07	59	2.30	—	—	—	—
	4-15B	砂岩	70.2	74.7	8.72	3.93	1.83	4.77	1.20	1.78	0.06	1.33	5.65	8.05	2.21	60	1.70	—	—	0.34	-2.75
	4-30	泥岩	52.2	58.0	16.8	8.37	3.89	3.00	0.43	3.95	0.05	1.22	8.58	3.11	2.12	75	1.34	4.13	-0.01	—	—
	4-18B	砂岩	69.1	73.6	9.73	4.31	2.03	4.39	0.99	2.10	0.05	1.10	5.82	7.11	2.05	64	1.54	—	—	0.79	-2.68
UCC			66.6	—	15.4	5.04	2.48	3.59	3.27	2.8	0.1	0.64	0.15	—	—	—	—	—	—	—	—

UCC 数据来源于 Rudnick 和 Gao (2003); * 样品数据与李磊和王忠伟等 (2025) 共用。

DF1 和 DF2 计算公式如下:

高硅型 $[(\text{SiO}_2)_{\text{adj}} = >63\% \sim \leq 95\%]$:

$$\text{DF1}_{(\text{Arc-Rift-Gol})\text{m1}} = [-0.263 \times \ln(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [0.604 \times \ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [-1.725 \times \ln(\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [0.660 \times \ln(\text{MnO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [2.191 \times \ln(\text{MgO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [0.144 \times \ln(\text{CaO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [-1.304 \times \ln(\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [0.054 \times \ln(\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [-0.330 \times \ln(\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + 1.588$$

$$\text{DF2}_{(\text{Arc-Rift-Gol})\text{m1}} = [-1.196 \times \ln(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [1.064 \times \ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [0.303 \times \ln(\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [0.436 \times \ln(\text{MnO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [0.838 \times \ln(\text{MgO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [-0.407 \times \ln(\text{CaO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [1.021 \times \ln(\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [-1.706 \times \ln(\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [-0.126 \times \ln(\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] - 1.068$$

低硅型 $[(\text{SiO}_2)_{\text{adj}} = >35\% \sim \leq 63\%]$:

$$\text{DF1}_{(\text{Arc-Rift-Gol})\text{m2}} = [0.608 \times \ln(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [-1.854 \times \ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [0.299 \times \ln(\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [-0.550 \times \ln(\text{MnO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [0.120 \times \ln(\text{MgO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [0.194 \times \ln(\text{CaO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [-1.510 \times \ln(\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [1.941 \times \ln(\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [0.003 \times \ln(\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] - 0.294$$

$$\text{DF2}_{(\text{Arc-Rift-Gol})\text{m2}} = [-0.554 \times \ln(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [-0.995 \times \ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [1.765 \times \ln(\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [-1.391 \times \ln(\text{MnO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [-1.034 \times \ln(\text{MgO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [0.225 \times \ln(\text{CaO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [0.713 \times \ln(\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [0.330 \times \ln(\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] + [0.637 \times \ln(\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] - 3.631$$

其中下标 adj 是指除去烧失量之后重新调整到 100% 后的百分含量。

附表 2 北羌塘拗陷胜利河西剖面和羌科 1 井夏里组样品微量元素含量 (μg/g) 及相关元素比值

Appendix 2 Trace elements abundances (μg/g) and associated ratios of the Xiali Formation samples from Shenglihexi section and Well QK-1, North Qiangtang Depression																												
剖面	编号	Cs	Rb	Ba	Th	U	Nb	Ta	Pb	Sr	Zr	Hf	Y	Sc	Cr	Co	Cu	Zr/Sc	Th/Sc	La/Th	La/Sc	Co/Th	Sr/Cu	Rb/Sr	Sr/Ba	Rb/K		
羌科1井	QK1-73	27.8	209	218	17.7	2.77	18.8	1.41	22.9	163	129	3.79	30.0	16.0	55.9	14.8	37.4	8.06	1.11	2.44	2.70	0.84	4.36	1.28	0.75	0.0066		
	QK1-158	15.4	132	319	13.4	2.45	15.4	1.14	17.7	211	121	3.73	27.3	10.7	51.2	11.9	27.1	11.3	1.25	2.70	3.38	0.89	7.79	0.63	0.66	0.0063		
	QK1-210	19.5	157	221	15.2	2.73	16.6	1.25	14.3	252	119	3.58	29.9	13.8	58.0	14.5	29.0	8.62	1.10	2.55	2.80	0.95	8.69	0.62	1.14	0.0059		
	QK1-271	19.5	172	247	14.8	2.85	17.3	1.23	11.0	259	140	4.30	30.9	15.8	47.0	14.1	29.4	8.86	0.94	2.70	2.53	0.95	8.81	0.66	1.05	0.0059		
	QK1-411	16.4	165	345	14.1	2.79	16.1	1.25	12.4	232	120	3.88	30.9	15.0	76.0	15.6	29.9	8.00	0.94	2.84	2.67	1.11	7.76	0.71	0.67	0.0058		
	QK1-467	13.2	126	813	13.0	2.90	15.5	1.21	87.8	863	106	3.56	28.9	11.5	63.1	16.5	36.4	9.22	1.13	2.91	3.29	1.27	23.7	0.15	1.06	0.0054		
	QK1-558	11.0	114	372	11.4	2.33	13.9	1.04	12.9	198	129	3.87	24.4	9.77	51.7	8.77	61.3	13.2	1.17	2.89	3.37	0.77	3.23	0.58	0.53	0.0057		
	QK1-663	15.2	163	339	14.2	2.76	15.1	1.15	13.6	170	122	3.97	28.0	15.2	62.9	14.1	29.6	8.03	0.93	2.64	2.47	0.99	5.74	0.96	0.50	0.0056		
	QK1-751	7.9	97.8	686	10.4	2.16	13.0	0.96	10.6	299	105	2.74	25.5	10.2	54.9	10.6	22.9	10.3	1.02	3.00	3.06	1.02	13.1	0.33	0.44	0.0056		
	QK1-843	13.3	147	309	12.8	2.43	14.0	1.02	14.5	163	106	2.78	28.8	15.3	65.8	16.0	34.1	6.93	0.84	2.82	2.36	1.25	4.78	0.90	0.53	0.0058		
胜利河西剖面	QK1-951	14.6	153	378	15.0	2.88	13.2	0.97	11.5	220	137	4.34	26.6	15.6	70.0	15.6	27.4	8.78	0.96	2.52	2.42	1.04	8.03	0.70	0.58	0.0056		
	QK1-1047	21.3	166	313	14.5	2.69	12.4	0.87	11.8	139	137	4.48	25.6	17.0	72.1	15.6	38.5	8.06	0.85	2.61	2.23	1.08	3.61	1.19	0.44	0.0055		
	4-6B	1.80	23.9	80.5	3.38	0.68	3.59	0.34	6.13	114	33.9	0.96	7.038	3.60	55.6	4.47	4.19	9.40	0.94	3.03	2.84	1.32	27.1	0.21	1.14	0.0035		
	4-1*	6.51	119	254	14.0	2.40	21.7	1.75	5.00	68.9	228	5.05	26.7	15.8	111	20.1	25.8	14.4	0.89	2.98	2.64	1.44	2.67	1.73	0.27	0.0041		
	4-4*	7.88	130	302	14.0	2.10	23.1	1.75	12.8	59.0	241	5.43	26.6	20.6	115	25.5	48.1	11.7	0.68	2.84	1.93	1.82	1.23	2.20	0.20	0.0038		
	4-5*	8.73	127	349	14.2	2.18	22.5	1.82	11.2	66.3	203	4.99	27.3	18.0	112	29.5	21.7	11.3	0.79	3.00	2.37	2.08	3.06	1.92	0.19	0.0038		
	4-7*	8.28	128	315	14.3	2.13	24.9	1.85	5.87	76.8	231	5.23	23.9	18.9	123	22.7	65.5	12.2	0.76	2.84	2.15	1.59	1.17	1.67	0.24	0.0042		
	4-8*	11.2	164	356	14.8	2.41	25.1	1.99	9.75	63.3	241	5.45	18.8	22.1	126	21.7	30.9	10.9	0.67	2.87	1.92	1.47	2.05	2.59	0.18	0.0044		
	4-9*	9.04	146	335	14.3	2.30	22.7	1.76	12.4	59.7	222	5.16	18.0	18.9	124	21.0	19.5	11.7	0.76	2.95	2.23	1.47	3.06	2.45	0.18	0.0042		
	4-10*	10.6	156	356	15.2	2.20	23.6	1.66	9.29	64.7	210	5.29	17.6	21.0	137	19.7	20.6	10.0	0.72	2.74	1.98	1.30	3.14	2.41	0.18	0.0042		
剖面	4-11*	7.98	134	268	12.8	1.96	21.8	1.61	4.62	88.5	206	4.51	22.3	16.5	119	18.0	41.6	12.5	0.78	2.73	2.12	1.41	2.13	1.51	0.33	0.0042		
	4-13*	7.64	116	239	12.0	2.14	18.3	1.51	6.96	117	179	4.13	23.0	17.5	115	21.7	31.8	10.2	0.69	3.18	2.18	1.81	3.68	0.99	0.49	0.0039		
	4-10B	1.43	33.3	111	4.55	0.87	6.02	0.55	9.58	54.3	74.4	2.43	12.8	5.28	83.1	6.17	5.39	14.1	0.86	3.32	2.86	1.36	10.1	0.61	0.49	0.0035		
	4-14*	9.14	140	300	15.0	2.36	25.3	1.83	14.0	67.9	232	5.46	25.2	21.3	144	28.2	17.5	10.9	0.70	2.99	2.11	1.88	3.88	2.06	0.23	0.0041		
剖面	4-16*	9.64	151	328	15.6	2.26	24.3	1.78	6.84	70.9	220	5.45	22.4	20.4	130	22.4	30.5	10.8	0.76	2.75	2.10	1.44	2.32	2.13	0.22	0.0042		

续表 2

剖面	编号	Cs	Rb	Ba	Th	U	Nb	Ta	Pb	Sr	Zr	Hf	Y	Sc	Cr	Co	Cu	Zr/Sc	Th/Sc	La/Th	La/Se	Co/Th	Sr/Cu	Rb/Sr	Sr/Ba	Rb/K
胜利河 西 剖 面	4-18*	9.36	138	316	14.8	2.18	22.9	1.81	7.59	71.6	228	5.41	25.3	21.5	151	23.3	117	10.6	0.69	3.02	2.08	1.57	0.61	1.93	0.23	0.0041
	4-20*	8.00	114	287	13.4	1.98	24.8	1.91	6.37	80.7	212	5.31	28.6	18.6	131	23.5	27.6	11.4	0.72	3.01	2.17	1.75	2.92	1.41	0.28	0.0036
	4-22*	8.79	131	333	14.2	2.12	21.7	1.76	7.07	76.8	212	4.80	25.4	18.6	146	23.0	46.4	11.4	0.76	2.90	2.22	1.62	1.66	1.71	0.23	0.0039
	4-24*	8.52	132	301	13.4	2.18	22.9	1.92	6.04	76.3	225	5.23	25.6	19.4	138	26.9	86.3	11.6	0.69	3.13	2.16	2.01	0.88	1.73	0.25	0.0041
	4-26	12.5	161	235	14.1	2.15	16.7	1.67	26.6	104	157	5.49	17.1	19.5	122	19.4	30.3	8.05	0.73	2.15	1.56	1.37	3.42	1.55	0.44	0.0049
	4-12B	4.59	78.5	225	9.77	1.67	13.7	1.32	21.7	97.6	137	4.71	18.4	12.1	112	15.9	47.0	11.2	0.80	2.72	2.19	1.62	2.08	0.80	0.43	0.0043
	4-28	7.47	104	208	11.0	1.80	13.8	1.29	8.85	143	135	4.97	19.8	16.3	119	12.6	12.8	8.28	0.67	2.65	1.79	1.15	11.2	0.73	0.69	0.0044
	4-14B	0.84	18.0	61.8	3.29	0.92	3.88	0.34	16.6	197	81.1	2.33	14.0	3.86	57.8	11.1	6.14	21.0	0.85	5.07	4.33	3.37	32.1	0.09	3.18	0.0045
UCC	4-15B	2.70	54.0	196	9.36	1.55	11.2	1.01	4.79	65.8	165	5.71	21.3	10.8	116	9.76	4.40	15.3	0.87	2.91	2.53	1.04	15.0	0.82	0.34	0.0037
	4-30	10.2	140	322	15.7	2.53	20.8	2.26	12.1	71.4	178	6.29	21.6	20.4	152	20.2	56.7	8.74	0.77	2.40	1.84	1.29	1.26	1.97	0.22	0.0043
	4-18B	3.35	67.1	233	9.42	1.53	11.1	0.99	6.26	69.3	147	5.25	20.8	11.9	121	14.2	8.33	12.4	0.79	3.20	2.54	1.51	8.33	0.97	0.30	0.0038
	UCC	4.9	84	628	10.5	2.7	12	0.9	17	320	193	5.3	21	14	92	17.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

UCC 数据来源于 Rudnick 和 Gao (2003); * 样品数据与李磊和王忠伟等 (2025) 共用。

附表 3 北羌塘凹陷胜利河西剖面 and 壳科 1 井夏里组样品稀土元素含量 (μg/g) 及相关参数

剖面 编号		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE/HREE	La/Yb	(La/Yb) _N	δEu	δCe
壳科 1 井	QK1-73	43.2	80.3	9.47	35.8	6.98	1.26	5.84	0.99	5.34	0.97	3.02	0.54	3.34	0.49	198	8.62	12.9	8.72	0.59	0.92
	QK1-158	36.2	67.9	7.96	31.4	6.32	1.20	5.45	0.95	4.81	0.88	2.69	0.45	2.94	0.43	170	8.12	12.3	8.30	0.61	0.92
	QK1-210	38.7	72.2	8.71	33.9	6.60	1.28	5.92	1.02	5.40	0.97	2.99	0.53	3.14	0.48	182	7.89	12.3	8.31	0.61	0.91
	QK1-271	40.0	75.6	9.14	35.3	6.76	1.23	5.97	1.07	5.43	1.02	3.19	0.56	3.50	0.49	189	7.92	11.4	7.71	0.58	0.92
	QK1-411	40.1	71.3	8.83	34.0	6.51	1.21	5.48	0.95	4.97	1.03	2.91	0.51	3.19	0.48	181	8.30	12.6	8.47	0.60	0.87
	QK1-467	37.8	66.5	8.37	31.1	6.20	1.18	5.30	0.93	4.76	0.98	2.77	0.48	2.90	0.44	170	8.14	13.0	8.79	0.61	0.86
	QK1-558	32.9	60.3	7.18	27.9	5.48	1.02	4.98	0.85	4.28	0.79	2.46	0.41	2.67	0.38	152	8.02	12.3	8.31	0.59	0.90
	QK1-663	37.5	69.6	8.49	33.2	6.06	1.26	5.32	0.93	4.91	0.92	2.82	0.49	3.19	0.45	175	8.20	11.8	7.93	0.66	0.90
	QK1-751	31.2	60.5	7.18	28.4	5.58	1.07	4.81	0.89	4.39	0.88	2.39	0.38	2.70	0.38	151	7.96	11.6	7.79	0.62	0.94
	QK1-843	36.1	69.2	8.12	31.5	5.99	1.16	5.32	0.92	4.83	0.96	2.64	0.46	2.88	0.42	170	8.25	12.5	8.45	0.62	0.94
胜利河西剖面	QK1-951	37.8	70.9	8.50	32.4	6.20	1.25	5.34	0.91	4.76	0.88	2.65	0.42	2.73	0.43	175	8.67	13.8	9.33	0.65	0.92
	QK1-1047	37.9	71.5	8.51	32.7	6.30	1.42	5.46	0.93	4.87	0.88	2.68	0.40	2.79	0.42	177	8.59	13.6	9.16	0.72	0.92
	4-6B	10.3	21.8	2.28	9.0	1.91	0.46	2.01	0.25	1.50	0.28	0.74	0.11	0.72	0.09	51.4	8.03	14.3	9.62	0.71	1.04
	4-1*	41.7	81.5	8.64	31.7	6.68	0.94	5.00	0.84	4.85	0.97	2.95	0.46	2.99	0.42	190	9.26	13.9	9.40	0.48	0.98
	4-4*	39.8	77.2	8.48	30.3	5.58	0.79	4.99	0.78	4.33	0.93	2.84	0.46	2.99	0.44	180	9.13	13.3	8.97	0.45	0.97
	4-5*	42.6	85.5	9.01	35.5	6.80	0.85	5.26	0.90	5.50	1.02	3.05	0.47	3.05	0.45	200	9.15	14.0	9.42	0.42	1.00
	4-7*	40.6	85.6	9.30	33.1	6.24	0.74	4.97	0.85	4.89	0.93	2.59	0.42	3.03	0.41	194	9.71	13.4	9.03	0.39	1.02
	4-8*	42.5	79.2	8.08	30.1	4.92	0.98	3.89	0.63	3.48	0.79	2.34	0.38	2.88	0.41	181	11.2	14.8	9.95	0.66	0.96
	4-9*	42.2	78.6	7.85	26.6	5.05	1.01	3.63	0.61	3.64	0.69	2.09	0.34	2.50	0.35	175	11.7	16.9	11.4	0.69	0.97
	4-10*	41.6	78.4	7.83	27.5	5.56	1.01	3.98	0.55	3.42	0.76	2.43	0.42	2.80	0.37	177	11.0	14.9	10.0	0.63	0.98
胜利河西剖面	4-11*	34.9	68.5	7.77	28.6	5.50	1.16	4.84	0.81	4.56	0.97	2.58	0.41	2.78	0.39	164	8.45	12.6	8.46	0.67	0.96
	4-13*	38.1	73.2	7.65	29.0	5.54	1.23	4.51	0.83	4.13	0.92	2.49	0.41	2.47	0.36	171	9.60	15.4	10.4	0.73	0.98
	4-10B	15.1	33.1	3.51	14.2	3.15	0.76	3.39	0.50	3.00	0.57	1.52	0.22	1.31	0.18	80.4	6.53	11.6	7.79	0.71	1.06
	4-14*	44.9	79.5	8.31	29.4	5.31	1.11	4.71	0.73	4.47	0.97	2.56	0.48	3.15	0.41	186	9.64	14.3	9.61	0.67	0.92
	4-16*	42.9	88.0	8.23	31.5	5.37	1.16	4.71	0.78	4.25	0.89	2.74	0.46	2.99	0.44	194	10.3	14.3	9.67	0.69	1.06
	4-18*	44.7	85.1	8.99	34.9	6.15	1.28	5.19	0.94	5.05	0.97	2.89	0.46	3.16	0.43	200	9.49	14.1	9.54	0.68	0.97
	4-20*	40.4	88.4	8.72	36.9	7.41	1.39	5.94	1.00	5.13	1.07	3.06	0.51	3.03	0.44	203	9.08	13.3	8.99	0.62	1.08
	4-22*	41.2	85.5	8.75	36.0	6.45	1.31	5.52	0.94	4.52	0.94	2.88	0.49	3.01	0.42	198	9.58	13.7	9.23	0.66	1.03
	4-24*	42.0	80.7	9.11	32.0	5.73	1.21	5.36	0.93	4.63	0.96	2.96	0.44	2.96	0.40	189	9.16	14.2	9.57	0.66	0.95
	4-26	30.5	60.6	6.01	22.4	3.98	0.90	3.83	0.54	3.53	0.76	2.32	0.36	2.44	0.30	138	8.84	12.5	8.44	0.69	1.02

续表 3

剖面	编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE/HREE	La/Yb	(La/Yb) _N	δEu	δCe
胜利河 河西 剖面	4-12B	26.6	57.5	6.00	23.3	4.75	1.01	4.74	0.68	4.12	0.81	2.29	0.33	2.16	0.28	135	7.73	12.3	8.28	0.64	1.05
	4-28	29.2	63.2	6.65	25.9	5.31	1.19	5.24	0.75	4.39	0.84	2.42	0.35	2.28	0.30	148	7.93	12.8	8.62	0.68	1.05
	4-14B	16.7	36.1	3.80	15.3	3.29	0.90	3.90	0.52	2.98	0.55	1.47	0.18	1.12	0.14	87.0	7.01	14.9	10.0	0.76	1.05
	4-15B	27.2	59.4	6.52	26.0	5.48	1.30	5.71	0.81	4.84	0.93	2.64	0.38	2.44	0.30	144	6.98	11.2	7.54	0.70	1.04
	4-30	37.6	73.9	7.33	26.7	4.82	0.99	4.46	0.68	4.41	0.94	2.83	0.43	2.98	0.40	168	8.84	12.6	8.52	0.64	1.01
球粒陨石	4-18B	30.2	65.2	6.92	26.7	5.54	1.21	5.46	0.78	4.78	0.92	2.57	0.37	2.33	0.30	153	7.75	12.9	8.73	0.66	1.05
	UCC	31.0	63.0	7.10	27.0	4.70	1.00	4.00	0.70	3.90	0.83	2.30	0.30	1.96	0.31	148	—	—	—	—	—
	PAAS	38.0	79.6	8.83	33.9	5.55	1.08	4.66	0.77	4.68	0.99	2.85	0.41	2.82	0.43	185	—	—	—	—	—
	球粒陨石	0.31	0.81	0.12	0.60	0.20	0.07	0.26	0.05	0.32	0.07	0.21	0.03	0.21	0.03	—	—	—	—	—	—

UCC 数据来源于 Rudnick 和 Gao (2003); PAAS 和球粒陨石数据来源于 Taylor 和 McLennan (1985); * 样品数据与李磊和王忠伟等 (2025) 共用。
LREE/HREE = (La+Ce+Pr+Nd+Sm+Eu) / (Gd+Tb+Dy+Ho+Er+Tm+Yb+Lu); δEu = 2Eu_N / (Sm_N+Gd_N); δCe = 2Ce_N / (La_N+Pr_N); 下标 N 代表球粒陨石标准化。