

基于主微量元素与风化指标的砂岩物源构造演化研究

——以平山湖盆地为例

王雨新¹, 嵇元玺², 汪正阳³, 陈锦坤¹, 朱俊涛¹, 赵骏东¹, 马强分¹

¹桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

²甘肃西域旅游文化投资有限责任公司, 甘肃 张掖

³汉中西北有色七一一总队有限公司, 陕西 汉中

收稿日期: 2026年4月11日; 录用日期: 2026年6月10日; 发布日期: 2026年6月18日

摘要

以河西走廊北缘平山湖盆地早白垩世庙沟群砂岩为研究对象, 通过主量元素、微量元素及稀土元素地球化学测试, 结合化学风化指标、构造环境与物源区判别图解, 系统分析沉积物化学风化程度、物源属性及构造背景。结果显示: 研究区砂岩CIA值集中于50~78, 整体为弱-中等化学风化, 风化过程受钾长石分解控制, 指示沉积期气候温和、沉积速率较快; 物源以中酸性长英质火成岩为主, 含少量再旋回石英质沉积岩组分, 排除基性火山岩为主要物源; 构造环境以活动大陆边缘与大陆岛弧为核心, 兼具被动大陆边缘特征, 无大洋岛弧物源输入。研究结果为平山湖盆地早白垩世沉积-构造演化及西北陆相盆地对比研究提供关键地球化学依据。

关键词

平山湖盆地, 早白垩世, 砂岩, 地球化学, 化学风化

Study on the Evolution of Sandstone Source Structure Based on Major Element Contents and Weathering Indicators

—A Case Study of Pingshanhu Basin

Yuxin Wang¹, Yuanxi Ji², Zhengyang Wang³, Jinshen Chen¹, Juntao Zhu¹, Jundong Zhao¹, Qiangfen Ma¹

¹College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

²Gansu Western Region Tourism Culture Investment Co., Ltd., Zhangye Gansu

文章引用: 王雨新, 嵇元玺, 汪正阳, 陈锦坤, 朱俊涛, 赵骏东, 马强分. 基于主微量元素与风化指标的砂岩物源构造演化研究[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(6): 886-894. DOI: 10.12677/ag.2026.166080

Abstract

Taking the Early Cretaceous Miaogou Group sandstones in the Pingshanhu Basin on the northern margin of the Hexi Corridor as the research object, systematic analyses of chemical weathering intensity, provenance properties and tectonic setting were carried out based on major, trace and rare earth element geochemical data, combined with weathering indices and tectonic-provenance discrimination diagrams. The results show that the CIA values of the sandstones range mainly from 50 to 78, indicating weak to moderate chemical weathering controlled by K-feldspar decomposition, which reflects a warm climate and rapid sedimentation rate during the deposition period. The provenance is dominated by intermediate-felsic igneous rocks with minor recycled quartzose sedimentary components, and basic volcanic rocks are excluded as the main source. The tectonic setting is characterized by active continental margin and continental island arc with some passive continental margin affinity, and no oceanic island arc source is identified. This study provides key geochemical evidence for the Early Cretaceous sedimentary-tectonic evolution of the Pingshanhu Basin and the correlation of continental basins in Northwest China.

Keywords

Pingshanhu Basin, Early Cretaceous, Sandstone, Geochemistry, Chemical Weathering

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. 前沿

陆相红层砂岩的地球化学组成与沉积环境响应,是解析盆地演化、古气候变迁与盆-山耦合过程的核心载体[1],也是当前沉积地质学与地球化学交叉领域的前沿方向。平山湖大峡谷地处河西走廊北缘、祁连山北麓与阿拉善地块过渡地带,发育早白垩世庙沟群厚层红色砂岩[2],以层序连续、露头清晰、构造-沉积记录完整著称,是研究中国西北晚中生代陆相盆地形成、物源转换与古环境演变的天然野外实验室。

近年来,碎屑锆石 U-Pb 定年、全岩主微量与稀土元素地球化学、Sr-Nd 同位素示踪等技术的广泛应用,推动红层盆地研究从宏观沉积相分析,走向物源精准示踪、风化强度定量表征、古环境精细恢复的定量化阶段。针对平山湖盆地的研究已初步揭示,其早白垩世沉积受南北双向物源控制,早期以北部阿拉善地块供给为主,晚期叠加南部祁连山带物质输入[3],记录了区域构造体制由挤压向伸展转换的关键信息。然而,现有工作多聚焦构造变形与年代学约束,针对砂岩地球化学与沉积环境的系统性耦合研究仍较薄弱[4];红层形成的古气候干湿波动、水体氧化还原条件、古盐度与水动力条件尚未明确[5];化学风化强度(CIA 等指标)、元素迁移规律与沉积相带的对应关系有待建立;地球化学特征对区域构造活动、古地貌格局与盆地动力学的响应机制仍需深化。

在此背景下,系统开展平山湖砂岩地球化学特征分析,通过主微量元素比值、沉积介质性质与构造背景研究,不仅能完善平山湖盆地早白垩世沉积演化序列,厘清红层发育的地球化学驱动机制,也可为

对比河西走廊及西北同类陆相盆地、重建晚中生代北方干旱化进程提供关键数据支撑。同时，研究成果可为区域地质遗迹保护、地质旅游开发与科学普及提供理论依据，具有重要的科学价值与应用前景。

2. 地质背景

公园范围内出露地层主要为第四系和下白垩系统庙沟群[6]，如图 1 所示。详细特征及分布如下：

1、白垩系地层构成园区砂岩地貌和彩色丘陵的物质基础，占公园地层出露面积的 90%。通过收集该区域资料，由南京地质古生物研究所对灰绿色泥岩孢粉鉴定，见有 *Chasmatosporites* (宽沟粉属)，*Ciasopollis* (克拉梭粉属)，*Perinopllenites* (薄属)，*Jiaohepollis* (蛟河粉属)，*Pinuspollenites* (双束松粉属)，*Abietinaepollenites* (单束松粉属)，*Piceapollenites* (云杉粉属)，*Psophosphaera* (皱球粉属) 16 粒裸子植物花粉，可以确定化石层时代属早白垩世。

(1) 下白垩统庙沟群下岩组(K_1mga)：分布于公园东部及南部，下部为灰绿色、由紫红色巨厚层、厚层砾岩和砂砾岩组成，局部夹紫红色、黄褐色含砾粗砂岩、粉砂岩等；上部夹褐色薄层状至中层状砂岩或含砾砂岩。砾石成分复杂，花岗质、砂质砾石混杂堆积。分选性差，砾石磨圆度较差。

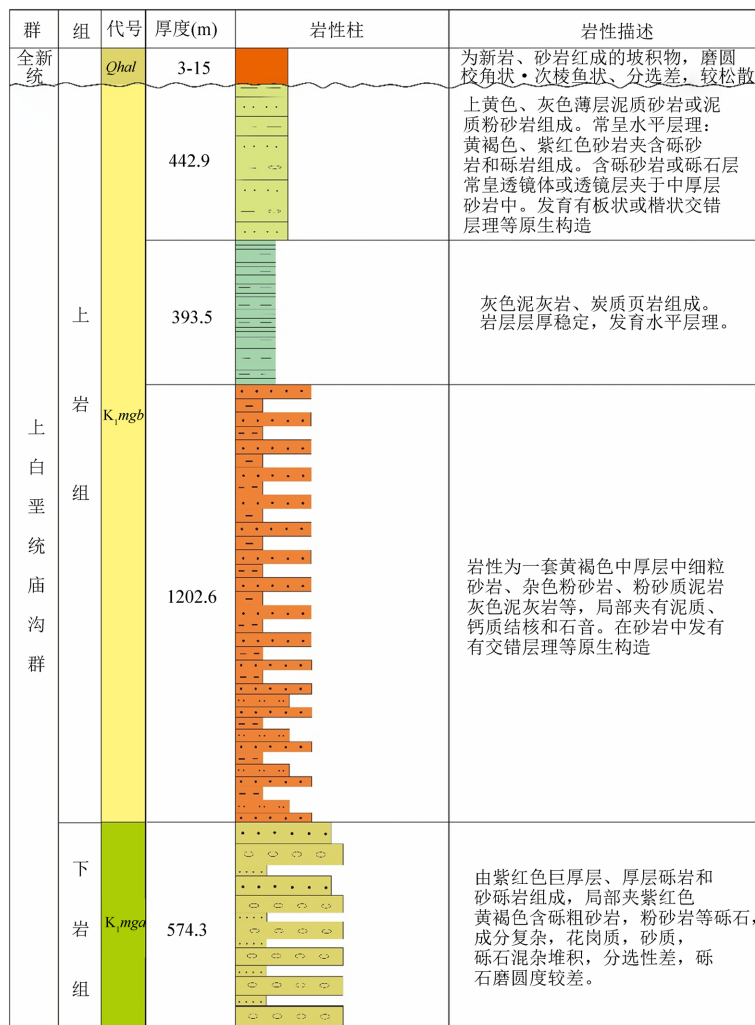


Figure 1. Comprehensive stratigraphic column chart of Pingshan Lake Geological Park (based on Shao Haohao, 2018)

图 1. 平山湖地质公园地层综合柱状图(据邵浩浩, 2018)

(2) 下白垩统庙沟群上岩组(K_1mgb): 分布于公园北部及西部, 岩性以杂色泥岩、粘土岩为主, 夹粉砂岩、页岩, 底部常夹砾岩或含砾砂岩, 局部夹有泥质、钙质结核和石膏。在砂岩中发育有交错层理等原生构造。

2、第四系主要为上更新统马兰黄土和全新统冲洪积物。

(1) 上更新统(O_3eol): 广泛披覆于园区丘陵地带, 风积成因, 浅黄色, 岩性为粉土, 含蜗牛化石、钙质结核及植物根系, 结构疏松, 质地均一, 大孔隙发育, 无层理, 垂直节理发育。

(2) 全新统(O_4al-pl): 主要分布于园区内夹皮河、流水河、青崖子河、夹山河、沙枣泉、白杨树河、石落泉河谷地带。为冲积、洪积砂砾石层, 砾石粒径一般为 4~6 厘米, 大者达 15 cm 以上。砾石分选差, 无定向排列; 磨圆度较好。

3. 样品采集与分析方法

3.1. 主量元素实验

平山湖大峡谷 36 件样品的主量元素在桂林理工大学实验室完成。所有样品在进行检测前, 经过研磨处理, 得到 200 目以下的粉末状样品。主量元素的测定利用 X 射线荧光光谱仪进行, 具体分析步骤如下: 首先将试样与熔融助熔剂充分混合, 经高温完全熔融后注入铂金模具中冷却成型, 制备成均质玻璃片; 随后使用 X 射线荧光光谱仪进行测定, 并对元素间光谱干扰进行校正, 确保分析误差控制在 2% 以内。烧失量(LOI)通过样品在 1000°C 马弗炉灼烧前后的质量差确定, 测试前样品需经烘箱干燥 30 分钟。本方法对各主量元素氧化物及烧失量的检测限均达到 0.01 wt%。

3.2. 微量元素实验

本研究的 36 件样品的微量和稀土元素在桂林理工大学实验室完成。所有样品经研磨至 200 目($<75 \mu m$)后, 采用四极杆电感耦合等离子质谱仪(Q-ICP-MS, PlasmaQuant-MS Elite, Germany)进行测定。具体包括:

(1) 酸消解处理: 依次使用盐酸(HCl)、硝酸(HNO_3)、氢氟酸(HF)和高氯酸($HClO_4$)对粉末样品进行全消解;

(2) 样品制备: 消解产物经干燥后, 用盐酸重新溶解并定容;

(3) 仪器分析: 本方法对微量元素的检测限达 0.01 ppm, 稀土元素检测限为 0.01~0.05 ppm, 满足高精度分析要求。

4. 地球化学特征与物源判别分析

4.1. 化学风化程度判别

物源区的风化过程通常会导致碱金属和碱土金属元素(如 K^+ 和 Na^+)发生迁移, 而某些稳定元素(如 Al^{3+} 和 Ti^{4+})则不易迁移, 仍滞留在沉积物中[7]。因此, 常采用一些风化指数来评估物源区的化学风化程度, 例如化学蚀变指数(CIA)、化学风化指数(CIW)和斜长石蚀变指数(PIA) [8] [9]。然而, 截至目前, 尚无直接方法区分硅酸盐与非硅酸盐(磷酸盐和碳酸盐)中的 CaO 含量。本文中, CaO 的获取采用 McLennan *et al.* (1993)提出的校正方法: 剩余 CaO (摩尔质量, 下同) = $CaO - P_2O_5 \times 10/3$, 若剩余 CaO $< Na_2O$, 则 $CaO = \text{剩余 CaO}$; 若剩余 CaO $> Na_2O$, $CaO = Na_2O$ [10]。在上述判别指数中, CIW 计算公式去掉了 K_2O , 但未排除钾长石中的 Al 元素; PIA 考虑了钾长石中的 Al 元素, 但仅适用于判断母岩中含有斜长石而不含钾长石的物源区风化程度; CIA 影响因素相对较少, 因此应用最为广泛。薄片观察显示, 蒂让碧错地区土门格拉组砂岩中可见少量钾长石, 表明 PIA 和 CIW 指数可能并不适用于研究区。使用 CIA 判断源区风化程度时, 需注意成岩过程中钾交代作用、沉积再循环作用及分选的影响[11]。将 CIA 值投在 Al_2O_3 -

(CaO + Na₂O)-K₂O (A-CN-K)三角图中, 不仅可用于判别物源区的风化强度, 也可评估样品受钾交代作用影响的程度。经历强烈风化的沉积物会落在三角图顶部的蒙脱石和伊利石附近(CIA = 80~100), 而弱风化程度的沉积物则位于长石界线附近(CIA = 50~70)。在 A-CN-K 三角图中(图 2), 岩石的理想风化趋势线通常与 A-CN 轴近平行。若样品的 CIA 值偏离理想风化趋势线, 则表明其受到成岩作用和钾交代作用的影响, 偏离越远则钾交代作用越强[12]。图中虚线将风化程度划分为未风化(CIA < 50)、弱化学风化(50~65)、中等化学风化(65~78)和强化学风化(>78)四个区间。

样品的 CIA 值主要集中在 50~78 之间, 大部分数据点分布于弱化学风化和中等化学风化区间, 表明研究区沉积物整体经历了中等强度的化学风化作用。少数样品 CIA 值低于 50, 接近未风化线, 可能代表了物源区新鲜母岩的直接输入; 部分样品 CIA 值高于 70, 接近中等化学风化上限, 暗示局部区域风化作用相对较强。数据点沿 A-K 方向分布, 表明钾长石(Kfs)的风化是控制 CIA 变化的重要因素, 物源区可能以富钾长石的中酸性火成岩为主。整体未出现极端强烈的化学风化, 指示沉积时期气候条件相对温和, 或沉积速率较快, 风化产物快速埋藏。

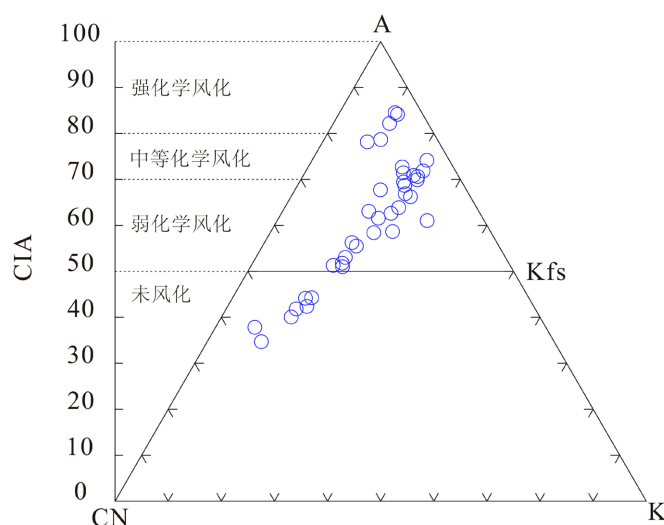


Figure 2. Triangular map of Sandstone of Mogou Group in Pingshan Lake Basin-A-CN-K

图 2. 平山湖盆地庙沟群砂岩 A-CN-K 三角图

4.2. 构造环境判别

通常认为, 物源区母岩的构造背景是控制碎屑沉积岩化学成分的重要因素[13]。不同构造背景下形成的沉积岩具有不同的化学成分, 并显示地球化学特征专属性[14]。为限定沉积物的构造背景, Bhatia (1983) 提出了 $(\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T} + \text{MgO})\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 、 $(\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T} + \text{MgO})\text{-TiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}\text{-SiO}_2$ 、 $\text{Th-Co-Zr}/10$ 及 La-Th-Sc 等判别图, 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[15]。近年来, Verma and Armstrong-Altrin (2013) 基于统计学原理, 依据新生代沉积物主要氧化物提出了两个新的多维判别图, 可有效区分碎屑岩沉积期碰撞、裂谷和岛弧三种不同构造背景, 因而被广泛应用[16]。其中, 碰撞型和裂谷型背景分别与前人划分的活动大陆边缘和被动大陆边缘相对应[17]。在判别图解中, 碎屑岩根据 SiO_2 含量不同进一步分为高硅(SiO_2) $\text{adj} = 63\% \sim 95\%$ 和低硅(SiO_2) $\text{adj} = 35\% \sim 63\%$ 两种类型, 其中 adj 代表剔除烧减量并将所有氧化物调整至 100% 校正后的氧化物含量。

在 $\text{TiO}_2\text{-}(\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T}) + \text{MgO})$ 图解中, 如图 3(a), 样品主要集中于 $\text{TiO}_2 < 0.8\%$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T}) + \text{MgO} < 6\%$ 的

区域,与长英质火成岩(如花岗岩、流纹岩)的地球化学特征高度吻合,指示物源以酸性岩为主,仅少数数据点显示有少量基性岩组分混入。在 Ti/Zr-La/Sc 图解中,如图 3(b),大部分样品落入大陆岛弧(CIA)和活动大陆边缘(ACM)区域,少数点靠近被动大陆边缘(PM),表明构造背景以活动大陆边缘为主,兼具少量被动陆缘特征,且 La/Sc 比值偏低,反映物源区以中酸性火成岩为主。La-Th-Sc 三角图解中,如图 3(c),数据点高度集中于活动大陆边缘(ACM)和大陆岛弧(CIA)区域,无样品落入大洋岛弧(OIA)区域,进一步确认构造环境以活动大陆边缘为主,排除了大洋岛弧物源的可能。Th-Co-Zr/10 三角图解显示,如图 3(d),样品主要分布于大陆岛弧(CIA)和活动大陆边缘(ACM)区域,部分点靠近大洋岛弧(OIA)边界,暗示可能有少量基性岩组分或大洋岛弧物质的混入。Th-Sc-Zr/10 三角图解中,如图 3(e),数据点高度集中于被动大陆边缘(PM)和大陆岛弧(CIA)区域,表明物源具有混合特征,既有活动大陆边缘的中酸性火成岩,也有被动陆缘的沉积再旋回物质。

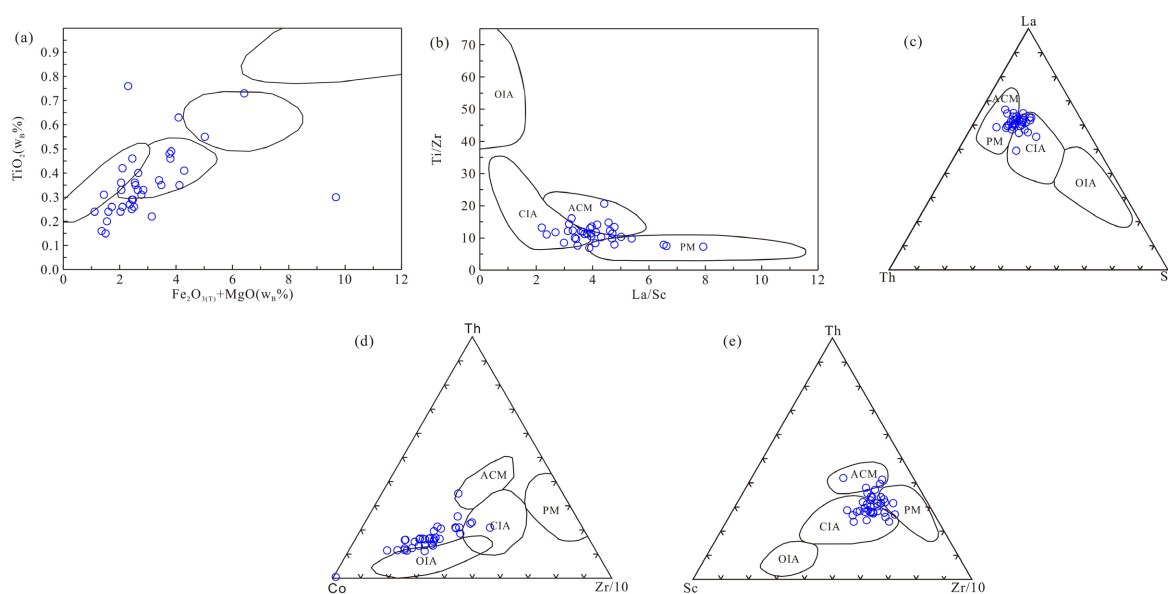


Figure 3. Chemical component structural background discrimination map of the Miao Gong formation sandstone in Pingshan Lake Basin

图 3. 平山湖盆地庙沟群砂岩化学组分构造背景判别图

4.3. 物源区类型判别(综合图解)

Roser and Korsch (1988)基于主量元素提出了一套适用于砂岩和泥岩物源区性质判别的函数(F1-F2),能够有效区分基性火山岩物源区、中性火山岩物源区(安山岩区)、酸性火山岩物源区(大陆边缘弧)以及成熟大陆石英质物源区(古老沉积体/克拉通/再旋回造山带) [18]。该判别函数在沉积岩物源区判别中的应用取得了良好效果[19]。在 F1-F2 因子分析图解中,如图 4(a),数据点主要分布于“酸性火山岩物源区”和“富含石英质沉积岩物源区”,少数点靠近“中型火山岩物源区”,表明物源以酸性火山岩和再旋回沉积岩为主,兼有少量中性火山岩贡献,无样品落入“基性火山岩物源区”,排除了基性岩作为主要物源的可能。在 $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 图解中,如图 4(b),数据点主要分布于“长英质火成岩”和“中性火成岩”区域, TiO_2 与 Al_2O_3 呈弱正相关,符合长英质岩石的地球化学规律,指示物源以中酸性火成岩为主。在 $\text{TiO}_2\text{-Zr}$ 图解中,如图 4(c),数据点集中于“长英质火成岩”区域,Zr 含量普遍较高(>50 ppm),符合酸性岩富锆的特征,少数高 TiO_2 、低 Zr 的点,可能代表了基性岩组分的混入。在 La/Hf-Hf 图解中,如图 4(d),数据点主要分布于“长英质物源”和“基型酸性混合物源”区域,La/Hf 比值偏低,表明物源区以中酸性火成

岩为主，且有一定程度的沉积再旋回作用，部分样品沿“古老物质组分增加趋势”箭头分布，暗示物源中存在再旋回的古老沉积物质。在 Co/Th-La/Sc 图解中，如图 4(e)，数据点整体远离玄武岩参考点，靠近安山岩参考点，Co/Th 比值偏低，符合长英质岩石的特征，表明物源以中性 - 酸性火成岩为主，排除了基性岩作为主要物源的可能。

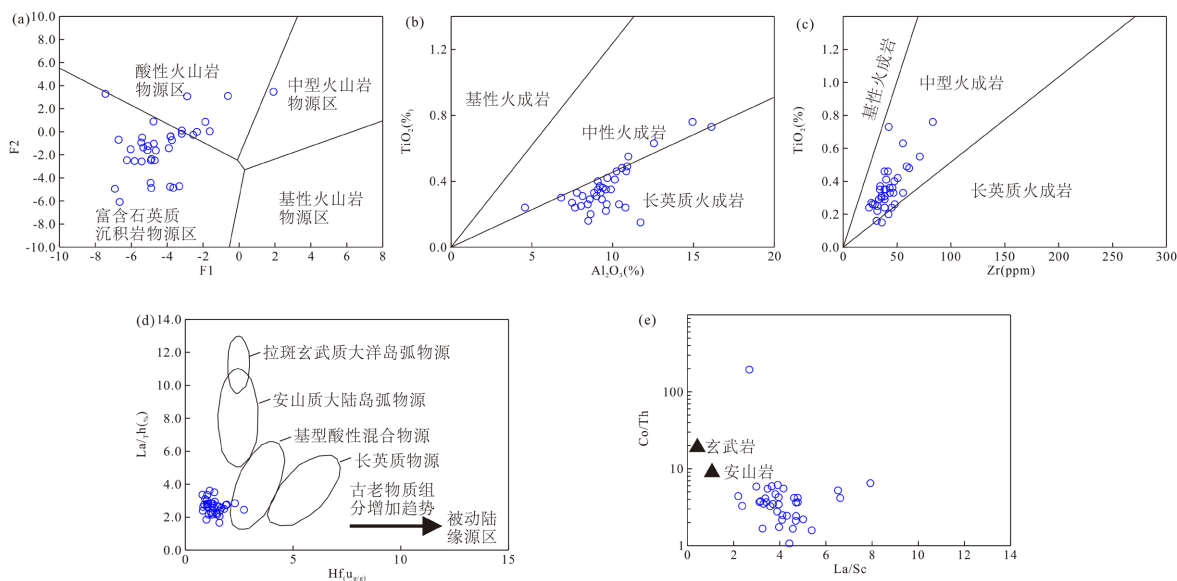


Figure 4. Diagram for discriminating the source attributes of sandstone in Miao Gong group of Pingshan Lake Basin

图 4. 平山湖盆地庙沟群砂岩物源属性判别图解

5. 结论

本研究通过对研究区沉积物开展主量元素、微量元素地球化学分析，结合 A-CN-K 风化判别图、多组构造环境判别图解及物源区类型识别图解，系统揭示了沉积物的化学风化特征、物源属性及形成的构造背景，得出以下核心实验结论：

(1) 化学风化程度：研究区沉积物整体经历了中等强度的化学风化作用，CIA 值主要集中在 50~78 区间，以弱 - 中等化学风化为主，仅少数样品显示未风化特征。风化过程受钾长石分解控制，且未出现极端强风化现象，指示沉积时期气候温和，或沉积物因沉积速率较快而快速埋藏，未经历长期风化改造。下岩组样品的 CIA 值介于 50~72 (均值 61.2)，上岩组介于 58~78 (均值 68.5)。从下岩组到上岩组，CIA 均值升高约 7 个单位，指示晚期风化强度有所增强。PIA 和 CIW 表现出相似趋势。A-CN-K 三角图中，下岩组数据点更靠近长石基线，上岩组则向蒙脱石 - 伊利石区域轻微移动。该变化可能反映：1) 沉积晚期气候向更温暖湿润条件转变；2) 沉积速率降低，使风化产物得以更充分发育；3) 物源区抬升剥蚀加深，暴露了风化程度更高的古老地层。

(2) 物源岩性特征：沉积物物源具有显著的中酸性火成岩主导特征，核心为酸性火山岩、花岗岩等长英质岩石，同时兼有少量中性火山岩及再旋回石英质沉积岩的贡献。实验数据排除了基性火山岩作为主要物源的可能，仅个别样品显示微量基性岩组分混入，且物源中存在一定比例的古老沉积物质再旋回组分，反映了物源区岩性的混合性。La/Sc vs. Th/Sc：下岩组样品 La/Sc = 2.1~4.5，Th/Sc = 0.6~1.2，数据点沿长英质火成岩演化趋势分布，远离基性岩区。上岩组样品比值范围略有扩大 (La/Sc = 2.5~5.2，Th/Sc = 0.7~1.5)，部分点向安山岩区偏移，暗示晚期可能有少量中性火山岩贡献。Zr/Sc vs. Th/Sc：所有样品均沿岩浆分异趋势分布，未出现显著的 Zr/Sc 陡增 (>20)，表明沉积再旋回作用不明显，物源以新鲜火成岩为

主。但上岩组个别样品 Zr/Sc 略高于下岩组, 指示晚期可能有少量锆石富集或沉积再旋回物质加入。Co/Th vs. La/Sc: 几乎所有样品均落入中-酸性弧环境区域, 无向玄武岩区偏移趋势。从上岩组到下岩组, Co/Th 比值没有系统性变化, 排除基性岩物源显著增加的可能。

(3) 构造背景属性: 沉积物形成的构造环境以活动大陆边缘(ACM)和大陆岛弧(CIA)为核心, 同时兼具被动大陆边缘(PM)的物质特征, 未发现大洋岛弧(OIA)物源的贡献。这一特征表明, 研究区在沉积时期处于活动大陆边缘与大陆岛弧的过渡构造域, 物源区既受岛弧岩浆活动的控制, 又叠加了被动陆缘沉积物质的再旋回过程, 记录了复杂的区域构造演化历史。将下岩组与上岩组样品分别投于 Th-Co-Zr/10、La-Th-Sc 等构造判别图解, 两组样品均主体落入活动大陆边缘(ACM)与大陆岛弧(CIA)重叠区, 无大洋岛弧(OIA)信号。构造背景在垂向上未发生根本性转变, 表明早白垩世期间研究区始终处于安第斯型活动陆缘/陆缘弧构造体制控制下。物源成分的微小变化(如晚期出现更多来自祁连造山带的中酸性物质)并未改变总体构造环境归属。

(4) 平山湖盆地早白垩世砂岩地球化学所揭示的“活动大陆边缘/大陆岛弧”双重信号, 并非对单一构造体系的响应, 而是中亚-中国西北晚中生代多构造体系叠合效应的物质记录。早白垩世期间, 研究区处于三大构造域交接部位: 北部蒙古-鄂霍次克洋的剪刀式闭合在晚侏罗世-早白垩世达到高峰, 其远程挤压效应向南传递至阿拉善地块北缘, 在物源区岩石中保留了活动大陆边缘印记; 南部新特提斯洋北支的持续俯冲形成安第斯型活动陆缘, 其构造-岩浆作用通过祁连造山带向北影响, 贡献了大陆岛弧信号; 与此同时, 华北克拉通破坏峰期引发的伸展背景虽控制盆地断陷性质, 但砂岩地球化学信号主要继承自南北两侧造山带中生代-早中生代的岛弧杂岩、增生花岗岩及碰撞相关岩石。因此, 该信号是对蒙古-鄂霍次克洋闭合远程效应、新特提斯俯冲陆缘弧效应及华北克拉通破坏三者共同作用的“化学化石”记录, 无大洋岛弧物源输入进一步确认其陆缘弧与增生造山带来源。

致 谢

衷心感谢邵学斌、朱俊涛、赵俊涛在课题研究及论文撰写中给予的指导与支持, 诸位数据整理及文稿修改等方面提供诸多宝贵建议, 使本论文得以顺利完成, 在此致以诚挚谢意。

基金项目

省部级项目广西科技计划项目青年基金项目——华南早寒武世硅质岩中的放射虫起源及早期演化研究-2023GXNSFBA026273。

参考文献

- [1] 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 等. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. 岩石学报, 2006(3): 521-533.
- [2] 邵浩浩, 陈宣华, 张达, 等. 河西走廊平山湖盆地早白垩世构造变形期次及其碎屑锆石 U-Pb 年龄约束[J]. 中国地质, 2019, 46(5): 1079-1093.
- [3] 邵浩浩. 河西走廊平山湖盆地早白垩世地层沉积特征及其构造演化[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [4] 杨江海, 杜远生, 朱杰. 甘肃景泰崔家墩下奥陶统阴沟组砂岩化学组分特征及物源区构造背景判别[J]. 古地理学报, 2007(2): 197-206.
- [5] 程强, 寇小兵, 黄绍祺, 等. 中国红层的分布及地质环境特征[J]. 工程地质学报, 2004(1): 34-40.
- [6] 张荷生, 崔振卿. 甘肃省张掖丹霞与彩色丘陵地貌的形成与景观特征[J]. 中国沙漠, 2007(6): 942-945+1095.
- [7] 杜建国. 大别造山带中生代岩浆作用与成矿地球化学研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2000.
- [8] 冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 等. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用[J]. 地学前缘, 2003(4): 539-544.

- [9] 徐小涛, 邵龙义. 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[J]. 古地理学报, 2018, 20(3): 515-522.
- [10] McLennan, S.M., Hemming, S., McDaniel, D.K. and Hanson, G.N. (1993) Geochemical Approaches to Sedimentation, Provenance, and Tectonics. In: *Geological Society of America Special Papers*, Geological Society of America, 21-40. <https://doi.org/10.1130/spe284-p21>
- [11] 李绪龙, 张霞, 林春明, 等. 常用化学风化指标综述: 应用与展望[J]. 高校地质学报, 2022, 28(1): 51-63.
- [12] 何龙. 四川盆地东南缘五峰组——龙马溪组页岩有机质富集机制及沉积环境演化[D]: [博士学位论文]. 广州: 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 2020.
- [13] 赵红格, 刘池洋. 物源分析方法及研究进展[J]. 沉积学报, 2003(3): 409-415.
- [14] 侯增谦, 杨竹森, 徐文艺, 等. 青藏高原碰撞造山带: I. 主碰撞造山成矿作用[J]. 矿床地质, 2006(4): 337-358.
- [15] Bhatia, M.R. (1983) Plate Tectonics and Geochemical Composition of Sandstone. *The Journal of Geology*, **91**, 611-627. <https://doi.org/10.1086/628815>
- [16] Verma, S.P. and 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. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.07.014>
- [17] 邹凤辉. 西秦岭共和盆地周缘中二叠-晚三叠世岩浆岩成因、构造意义及其与干热岩关系探讨[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2023.
- [18] Roser, B.P. and Korsch, R.J. (1988) Provenance Signatures of Sandstone-Mudstone Suites Determined Using Discriminant Function Analysis of Major-Element Data. *Chemical Geology*, **67**, 119-139. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90010-1)
- [19] 田洋, 赵小明, 王令占, 等. 鄂西南利川三叠纪须家河组地球化学特征及其对风化、物源与构造背景的指示[J]. 岩石学报, 2015, 31(1): 261-272.