

引用格式: 钟瑶琪, 姚卫华, 任睿悦, KUSUMANINGRUM Heni, 何文康. 滇中地区下寒武统筇竹寺组沉积地球化学特征及地质意义[J/OL]. 沉积学报, 2026, 1-23. [ZHONG YaoQi, YAO WeiHua, REN RuiYue, KUSUMANINGRUM Heni, HE WenKang. Geochemical Features and Geological Implications of the Early Cambrian Qiongzhusi Formation in the Central Yunnan Region [J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica, 2026, 1-23]

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.002

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2026.002

滇中地区下寒武统筇竹寺组沉积地球化学特征及地质意义

钟瑶琪¹, 姚卫华^{1,2}, 任睿悦¹, KUSUMANINGRUM Heni¹, 何文康^{1,3}

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东珠海 519080

2. 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广东珠海 519080

3. 江西铜业股份有限公司武山铜矿, 江西瑞昌 332204

摘要 【目的】开展滇中地区下寒武统筇竹寺组沉积岩的沉积成岩环境、源岩类型、源区风化和古气候特征、源区大地构造背景等研究, 为滇中地区资源调查提供基础地质资料。【方法】选择位于滇中地区饮马池剖面筇竹寺组为研究对象, 开展野外实测地层剖面、沉积岩显微岩石学特征和全岩地球化学研究。【结果】饮马池剖面筇竹寺组以粉砂岩为主, 采集的粉砂岩样品全岩 U/Th 比值介于 0.23~0.81, V/Cr 比值介于 1.38~3.56, V/Sc 比值介于 7.36~18.9, Ni/Co 比值介于 2.34~4.85, Ba/Sr 比值介于 9.04~16.2, La/Ce 比值介于 0.48~0.57, (La/Yb)_n 比值为 0.54~1.25, δ Eu 介于 0.62~0.67。【结论】滇中地区筇竹寺组的源岩以酸性岩浆岩和硅质沉积岩为主, 含少量中基性岩组分。经过强烈化学风化和搬运后, 碎屑物沉积于氧化型浅海陆棚环境, 沉积成岩过程可能受到热液活动的影响。筇竹寺组的源岩区可能包括本土的康滇古陆和外来的冈瓦纳大陆。早寒武世源岩区处于温暖湿润的气候环境, 并可能处于主动大陆边缘的构造环境。

关键词 滇中地区; 下寒武统筇竹寺组; 沉积环境; 风化和古气候; 源岩区

第一作者 钟瑶琪, 女, 2004 年出生, 本科, 沉积学, E-mail: zhongyq68@mail2.sysu.edu.cn

通信作者 姚卫华, 女, 副教授, 沉积学与沉积大地构造, E-mail: yaowh5@mail.sysu.edu.cn

中图分类号: P534.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-0550 (2026) 00-0000-00

0 引言

下寒武统筇竹寺组沉积于 525~518 Ma (Compston *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2018), 是澄江动物群的产出层位, 也是扬子板块页岩气勘探的重要层位 (Liu *et al.*, 2024), 其沉积环境和物质来源等一直是地质研究的重点。四川盆地及邻区已获取筇竹寺组工业性页岩气流, 研究程度较高。前人研究表明, 四川盆地筇竹寺组沉积物主要来源于扬子西缘川中古陆和康滇古陆 (牟传龙等, 2011), 作为页岩气优质烃源岩的黑色页岩系产出于筇竹寺组底部, 形成于深水陆棚环境 (Wang *et al.*, 2023)。与四川盆地相比, 滇中地区筇竹寺组研究程度较低。近年地质调查发现, 滇中地区筇竹寺组以细粒沉积岩为主, 岩性稳定, 分布面积广, 具有较好的页岩气资源潜力, 可加强其沉积环境和物质来源等方面的基础地质研究工作 (刘建清等, 2021; 杨永祯等, 2024)。

收稿日期: 2025-10-22; 修回日期: 2026-01-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42472146); 广东省自然科学基金项目 (2024A1515010778); 中山大学教学质量工程项目 (2023520); 大学生创新创业训练项目 (20250200)

陆源沉积岩的物质成分受控于源岩类型、源岩区的气候和风化条件等因素，可通过陆源碎屑岩的物质成分（化学和矿物）来解析源岩类型、风化作用过程、源岩区的古气候和大地构造背景（Bhatia, 1983, 1985）。本文以滇中梁王山地区为研究区，以区内阳宗镇饮马池剖面筇竹寺组为研究对象，通过野外实测地层剖面、显微岩石学分析和全岩地球化学分析等方法，对筇竹寺组细粒碎屑岩展开研究。同时，结合已发表的滇中地区筇竹寺组数据，综合研究了滇中地区筇竹寺组的沉积成岩环境、源岩类型和风化特征、源岩区古气候和构造背景等。本研究丰富了滇中地区筇竹寺组的研究工作，为扬子西缘筇竹寺组的资源调查提供了基础地质资料。

1 区域地质背景

滇中地区位于扬子地块西南缘、西太平洋构造域与特提斯构造域交接带，是华南大地构造格局的重要组成部分。研究区梁王山地区现今位于滇中昆明市和澄江市行政区之间，早寒武世时期位于康滇古陆东侧、牛首山古陆西北侧的一个滨海至浅海陆棚区（图 1a）。区内早寒武世地层露头保存完好，自下而上依次出露渔户村组、筇竹寺组、沧浪铺组和龙王庙组，地层小组之间均呈整合接触（云南省自然资源厅，2023）。渔户村组与下伏震旦系灯影组呈整合接触，龙王庙组与上覆晚古生代地层在区内呈断层接触（图 1b）。

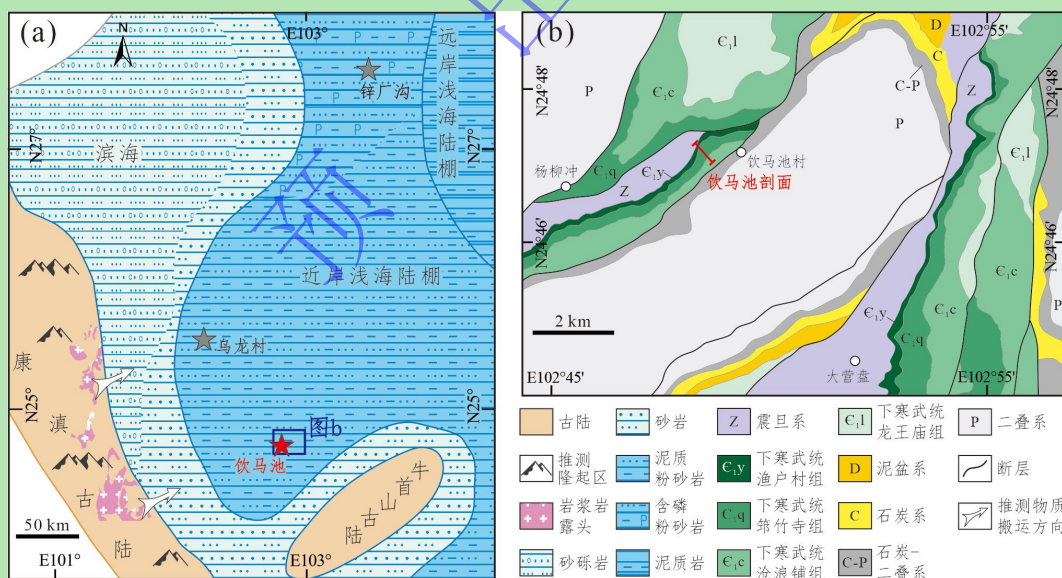


图 1 (a) 滇中地区早寒武世筇竹寺期岩相古地理图（据刘宝珺和许效松，1994 修改）；(b) 滇中地区饮马池剖面地质简图（据云南省自然资源厅，2023 修改）

Fig.1 (a) Early Cambrian (Qiongzhusi Age) paleogeographic map of the central Yunnan area, southwestern Yangtze Block (modified from Liu and Xu, 1994); (b) simplified geological map of the Yinmachi and surrounding regions, central Yunnan (modified from Department of Natural Resources of Yunnan Province, 2023)

自早寒武世起，区域发生海侵事件，滇中梁王山地区沉积环境从震旦纪末期的碳酸盐岩

局限台地转变为寒武纪早期的浅海陆棚,主导性沉积物从碳酸盐转变为陆源碎屑(冯增昭等, 2002)。四个早寒武世地层小组及其代表性岩石特征分别是:渔户村组灰黄色含磷粉砂岩及磷块岩,筇竹寺组灰黄色粉砂岩及泥岩(底部有少量黑色页岩),沧浪铺组灰绿色和紫红色细—中粒砂岩和龙王庙组灰色泥质白云岩(云南省自然资源厅, 2023)。梁王山地区早寒武世沉积序列的垂向变化体现出沉积环境从浅海陆棚向滨海,再向浅海碳酸盐岩台地演化的特征,并在以近岸浅海陆棚为主的环境中有短时间向远岸浅海陆棚环境的更替。早寒武世之后,区域构造活动使得梁王山地区发生地壳抬升,区内中寒武世至志留纪地层缺失,使得早寒武世地层与上覆泥盆纪地层呈不整合接触或断层接触(云南省自然资源厅, 2023)。

2 野外地质及室内实验方法

2.1 实测地层剖面

从研究区选择了饮马池剖面开展筇竹寺组地层的实测工作。剖面位于梁王山地区饮马池村至脚步哨村的乡道旁,是一段保存良好的人工地质露头。饮马池剖面筇竹寺组出露完整,底部与顶部分别与下伏渔户村组、上覆沧浪铺组呈整合接触(图 1b)。剖面起点坐标 $24^{\circ}47'9''$ N、 $102^{\circ}55'5''$ E, 海拔 2 442 m; 终点坐标 $24^{\circ}46'50''$ N、 $102^{\circ}54'58''$ E, 海拔 2 415 m。实测地层剖面工作包括筇竹寺组小层划分、每小层的岩石组合及岩性、岩石颜色、岩石结构、沉积构造及古生物、层与层的接触关系等。野外实测剖面时,从测制的 11 个筇竹寺组小层中采集了 20 件细粒沉积岩样品(图 2),用于室内实验测试及分析。

2.2 显微岩石学分析

将 20 件筇竹寺组细粒沉积岩样品分别磨制成 $30\ \mu\text{m}$ 厚的薄片,加盖玻片,以环氧树脂封固,制成岩石光学薄片。薄片磨制在广州市拓岩检测技术有限公司完成。将岩石光学薄片放置于蔡司偏光显微镜下,分别在不同放大倍数下用单偏光和正交偏光进行颗粒、基质和胶结物等成分的显微岩石学特征观察。显微岩石学分析在中山大学地球动力作用与地质灾害重点实验室完成。

2.3 全岩地球化学测试

对采集的 20 件筇竹寺组样品进行全岩地球化学元素测试,测试工作在广州市澳实矿物实验室完成。首先将岩石样品放入小型破碎机进行破碎,然后将破碎后的岩石放入碳化钨研钵和振动式碎样机中进行进一步粉碎,碎至 200 目以下,以便进行元素含量测试。主量元素测试采用 PANalytical 品牌 X 射线荧光光谱仪(X-ray Fluorescence Spectrometer, XRF),分析精度优于 5%。微量元素和稀土元素测试采用 Agilent 品牌电感耦合等离子体质谱

(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-MS), 分析精度优于 10%。实验流程与分析精度均符合国家标准 GB/T 14506.14—2010。



图 2 饮马池剖面下寒武统筇竹寺组实测地层柱状图及实测地层剖面图

Fig.2 Stratigraphic column and logged stratigraphic profile of the early Cambrian Qiongzhusi Formation, Yinmachi section

3 野外实测及室内实验测试结果

3.1 地层剖面特征

饮马池剖面实测地层工作共划分出 13 个岩石小层, 第 1 小层为渔户村组, 第 2~12 小层为筇竹寺组, 第 13 小层为沧浪铺组 (图 2)。根据岩性差异, 筇竹寺组可分为下段 (第 2~5 小层, 总厚度 9.4 m) 和上段 (第 6~12 小层, 总厚度 117.0 m)。

筇竹寺组下段第 2 小层为灰绿色中薄层海绿石石英砂岩 (图 3a), 厚度 2.0 m。第 3 小层为灰黑色薄层炭质页岩, 页理发育, 厚度 2.4 m。该小层炭质页岩的碳含量高, 极易污手。

第4和5小层为灰色中薄层和薄层粉砂质泥岩和粉砂岩，局部见水平纹理（图3b）。水平纹理的发育和细粒沉积岩的主导指示一个弱水到静水的沉积环境。黑色页岩则是沉积环境中缺氧、富有机质的表现。综合来看，筇竹寺组下段应沉积于一个还原型、弱水滞留的远岸浅海陆棚环境（图2）。



图3 饮马池剖面筇竹寺组野外地质照片

(a) 筇竹寺组下段第2~4小层地层序列；(b) 筇竹寺组下段第5小层粉砂质泥岩中发育的水平纹理；(c) 筇竹寺组上段第8小层粉砂岩中发育的小型交错层理

Fig.3 Field photographs of the Qiongzhusi Formation in the Yinmachi section

(a) first four layers of the lower member; (b) horizontal laminations in the silty mudstones of the fifth layer of the lower member; (c) small cross-beddings in the siltstones of the eighth layer of the upper member

筇竹寺组上段第6~12小层以灰黄色中薄层泥质粉砂岩、粉砂岩为主，间夹薄层细砂岩，其中仅第10小层厚8.1 m，以薄层泥岩为主，间夹粉砂质泥岩。此外，第12小层的岩石原生色较之其下伏的第6~11小层而言更偏氧化性，以黄褐色为主（图2）。筇竹寺组上段普遍发育水平纹理，且第8小层局部发育小型交错层理（图3c）。灰黄色—黄褐色的原生色、粉砂岩和泥质粉砂岩为主的沉积序列共同指示了氧化型浅水环境的特征。小型交错层理的发育指示了一个水动力中等—偏弱的沉积环境。因此，筇竹寺组上段应沉积于一个氧化型近岸浅海陆棚环境（图2）。

整体来看，饮马池剖面筇竹寺组厚度为126.4 m，而沉积于近岸浅海陆棚环境的筇竹寺组上段厚117.0 m，占地层组总厚度的93%。因此，可以认为筇竹寺组以近岸浅海陆棚相为优势相带。

3.2 显微岩石学特征

从饮马池剖面采集了 20 件筇竹寺组细粒沉积岩样品（图 2）进行显微岩石学特征分析。镜下粒度大小鉴定显示，20 件样品的颗粒粒径主要介于 0.063~0.004 mm，均属于粉砂岩类（图 4a, b）。其中，粗粉砂（粒径 0.063~0.03 mm）含量约 55%，细粉砂（粒径 0.03~0.004 mm）含量约 45%。颗粒多为棱角状—次棱角状，分选性一般，偏光显微镜尺度下可识别的矿物以石英为主，另有少量长石和白云母（图 4c, d）。

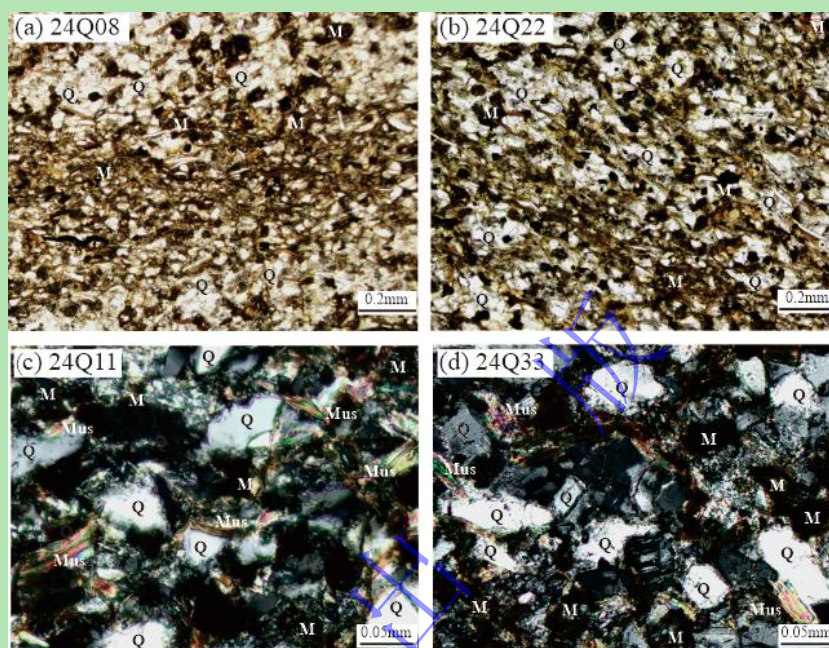


图 4 饮马池剖面筇竹寺组粉砂岩偏光镜下显微照片

Q.石英; Mus.白云母; M.基质

Fig.4 Polarized-light photomicrographs of siltstone samples of the Qiongzhusi Formation in the Yinmachi section

Q. quartz; Mus. muscovite; M. matrix

3.3 全岩地球化学特征

3.3.1 主量元素

全岩主量元素数据（附表 1）表明，20 件粉砂岩样品 SiO_2 平均含量为 65.6%， TiO_2 平均含量为 0.76%， Al_2O_3 平均含量为 14.9%， Fe_2O_3 （以 Fe_2O_3 表示全铁含量）平均含量为 5.76%， MnO 平均含量为 0.07%， MgO 平均含量为 3.51%， CaO 平均含量为 0.13%， Na_2O 平均含量为 0.11%， K_2O 平均含量为 4.23%， P_2O_5 平均含量为 0.25%。其中， SiO_2 的含量普遍较高（57.6%~67.8%）， Al_2O_3 含量也相对较高（13.7%~19.3%），说明这些粉砂岩样品富含石英等硅质矿物，且经历了较强的化学风化作用（McLennan *et al.*, 1993; 姜在兴等, 2013）。

将饮马池样品主量元素分别与上大陆地壳（Upper Continental Crust, UCC）、后太古代澳大利亚平均页岩（Post-Archean Australian Average Shale, PAAS）进行对比并做标准化处

理 (Taylor and McLennan, 1985)。相比 UCC 而言, 20 件饮马池样品的 Ti、Fe、Mg、K、P 元素相对富集, Ca、Na 元素相对亏损 (图 5a)。相比 PAAS 而言, 样品的 Mg、K、P 元素相对富集, Ti、Mn、Ca、Na 元素相对亏损 (图 5b)。K 富集和 Na 亏损使得样品的 K_2O/Na_2O 比值较高 (12.6~74.2), 显著高于 UCC (0.82) 和 PAAS (3.08), 说明样品在风化过程中经历了 Na 元素的淋滤作用, 在成岩过程中经历了 K 元素的交代作用 (Zhai *et al.*, 2018)。20 件饮马池样品的 Mn 元素均波动较大, 其中样品 24Q17 的 Mn 元素含量异常高, 可能与它在成岩作用中遭受孔隙水影响有关。

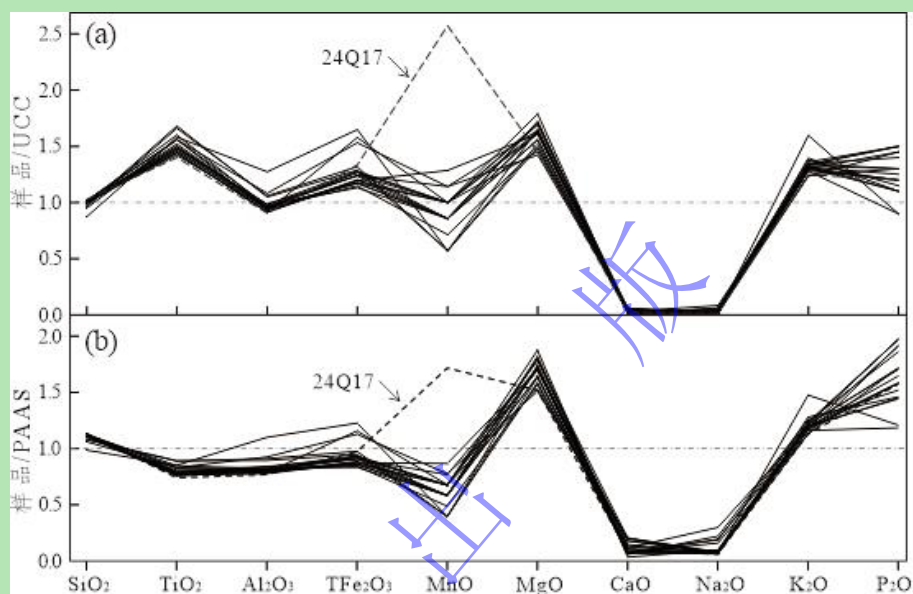


图 5 饮马池剖面筇竹寺组沉积岩样品经 UCC 标准化 (a) 和经 PAAS 标准化 (b) 后的主量元素配分模式图。其中, UCC 和 PAAS 主量元素数据来源于 Taylor and McLennan, 1985

Fig.5 Major element pattern of sedimentary rock samples from the Qiongzhusi Formation, Yinmachi section: (a) UCC-normalized; (b) PAAS-normalized (UCC and the PAAS geochemical data from Taylor and McLennan, 1985)

3.3.2 微量元素

饮马池样品的全岩微量元素数据见附表 2。将其分别用 UCC 和 PAAS 微量元素平均值 (Taylor and McLennan, 1985) 进行标准化处理 (图 6a, b)。相对 UCC 和 PAAS 而言, Co、Cu、Sr、Cd、Cs、Pb 元素均表现出亏损, Sb 元素表现出强烈富集, V、Zn、Mo、Bi 和 U 元素的波动则相对较大 (图 6a, b)。20 件样品的 Sr 元素含量为 33.9~52.0 $\mu\text{g/g}$ (平均值为 44.0 $\mu\text{g/g}$), 显著低于 UCC (350 $\mu\text{g/g}$) 和 PAAS (200 $\mu\text{g/g}$)。20 件样品的 Sb 元素含量为 0.30~1.00 $\mu\text{g/g}$ (平均值为 0.57 $\mu\text{g/g}$), 高于 UCC (0.20 $\mu\text{g/g}$) 和 PAAS (0.09 $\mu\text{g/g}$)。

3.3.3 稀土元素

20 件饮马池样品的总稀土元素含量介于 152~215 $\mu\text{g/g}$ (附表 3)。其中, 轻稀土元素 (LREE) 含量介于 128~192 $\mu\text{g/g}$ (平均值为 157 $\mu\text{g/g}$), 重稀土元素 (HREE) 含量介于

21.1~42.2 $\mu\text{g/g}$ (平均值为 25.2 $\mu\text{g/g}$)。轻重稀土元素比值 (LREE/HREE) 介于 3.89~8.38 (平均值为 6.37), 反映了样品的轻稀土元素强烈富集, 重稀土元素强烈亏损。利用 UCC 和 PAAS 稀土元素平均值 (Taylor and McLennan, 1985) 对饮马池样品分别做标准化处理。结果显示, 样品相较于 UCC 出现弱的轻稀土富集和中等重的重稀土富集(图 6c), 相较于 PAAS 未出现明显的稀土元素富集或亏损(图 6d)。样品的 δEu 值介于 0.62~0.67 (平均值为 0.65), δCe 值介于 0.79~0.96 (平均值为 0.88, 附表 3)。

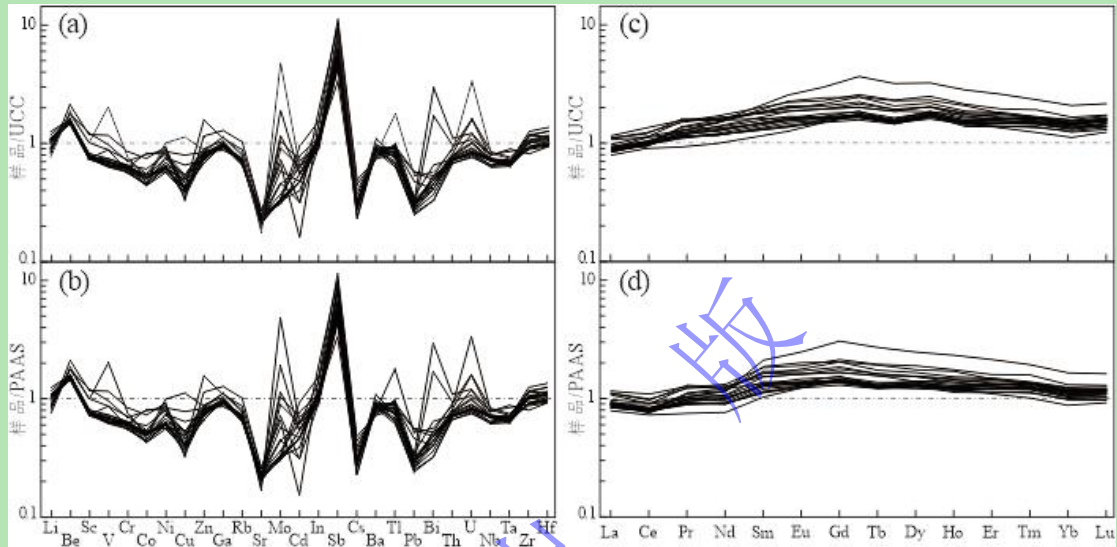


图 6 饮马池剖面筓竹寺组沉积岩样品经 UCC 标准化 (a) 和经 PAAS 标准化 (b) 后的微量元素配分模式图, 经 UCC 标准化 (c) 和经 PAAS 标准化 (d) 后的稀土元素配分模式图 (UCC 和 PAAS 微量元素和稀土元素数据来源于 Taylor and McLennan, 1985)。

Fig.6 Element patterns in sedimentary rock samples from the Qiongzhusi Formation, Yinmachi section: (a) UCC-normalized trace element pattern; (b) PAAS-normalized trace element pattern; (c) UCC-normalized rare-earth element pattern; (d) PAAS-normalized rare-earth element pattern (UCC and PAAS geochemical data from Taylor and McLennan, 1985).

4 讨论

4.1 沉积岩及其沉积成岩环境

4.1.1 沉积岩类型

由野外和镜下岩石学特征可知, 饮马池剖面筓竹寺组样品 (简称饮马池样品) 以粉砂岩为主 (图 4)。从全岩主量元素成分来看, 饮马池样品属于杂砂岩和泥岩页岩 (图 7), 矿物颗粒细小、成分成熟度低。从同处于浅海陆棚环境中的乌龙村剖面 (杨永祯等, 2024) 和 锌厂沟剖面 (刘建清等, 2021) 采集的筓竹寺组细粒沉积岩样品 (分别简称乌龙村样品、锌厂沟样品) 也基本落入杂砂岩和泥岩页岩的范围。三组样品在 $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ vs $\log(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$ 投影图上呈现良好的线性关系。随着沉积岩粒度减小, 全岩 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值

减小、 ${}^T\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ 比值增大,说明粉砂岩经历强烈化学风化之后向泥页岩转化的过程(图7)。

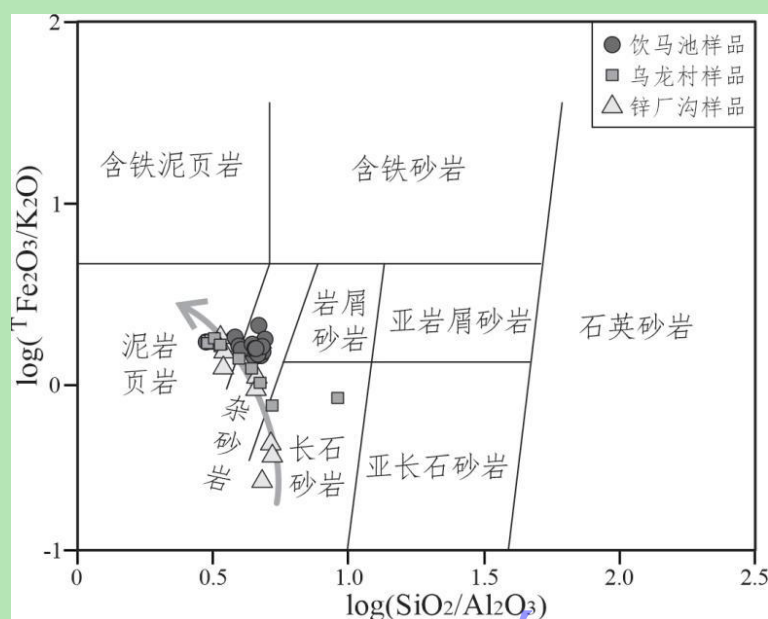


图7 筇竹寺组沉积岩 $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ vs $\log({}^T\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$ 投影图 (据 Herron, 1988 修改)

Fig.7 Bivariate plot of $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ vs. $\log({}^T\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$, Qiongzhusi sedimentary rocks (modified from Herron, 1988)

4.1.2 沉积环境的氧化还原条件

沉积环境的含氧量可影响 U、Cr、Sc、Ni、Co 和 Mo 等过渡性金属元素的化学活动性 (Algeo and Tribouillard, 2009)。反之, 这些过渡性金属元素与化学活动性稳定元素的比值则可用来分析沉积环境的含氧条件 (付修根等, 2024)。如, U 元素易溶于富氧型水体而难溶于缺氧型水体, Th 元素不受沉积水体氧化还原条件的影响, U/Th 比值即可作为氧化还原指示剂。当 $\text{U}/\text{Th} \geq 0.5$ 时, 一般指示还原环境; 当 $\text{U}/\text{Th} < 0.5$ 时, 一般指示氧化环境 (Wignall and Twitchett, 1996)。类似地, V/Cr、V/Sc 和 Ni/Co 比值在不同氧化条件的沉积环境中也有明显区别 (Kimura and Watanabe, 2001)。从 20 件饮马池样品的元素比值垂向变化图上可以清晰地看到沉积环境氧化条件的分段式变化。筇竹寺组上段从 U/Th、V/Cr、V/Sc 和 Ni/Co 比值上均具有氧化性沉积环境的特征; 筇竹寺组下段的各项元素比值则具有还原性沉积环境的特征 (图 8)。微量元素比值与筇竹寺组沉积岩的岩性和颜色等特征 (图 2) 所指示的氧化还原条件是一致的。

元素富集系数 Mo_{EF} 和 U_{EF} 是沉积物/岩中 Mo 和 U 元素相对 PAAS 的富集程度, 也可用于推断沉积环境的氧化还原条件 (Taylor and McLennan, 1985)。开放海洋环境中, 氧化型水体能溶解更多 Mo 和 U 元素, 因此沉积物中的 Mo_{EF} 和 U_{EF} 值较低 (Tribouillard et al., 2012)。对饮马池样品的元素富集系数 Mo_{EF} 和 U_{EF} 进行垂向变化分析 (图 8), 同样发现筇竹寺组下段沉积于还原环境, 上段沉积于弱氧化—氧化环境。

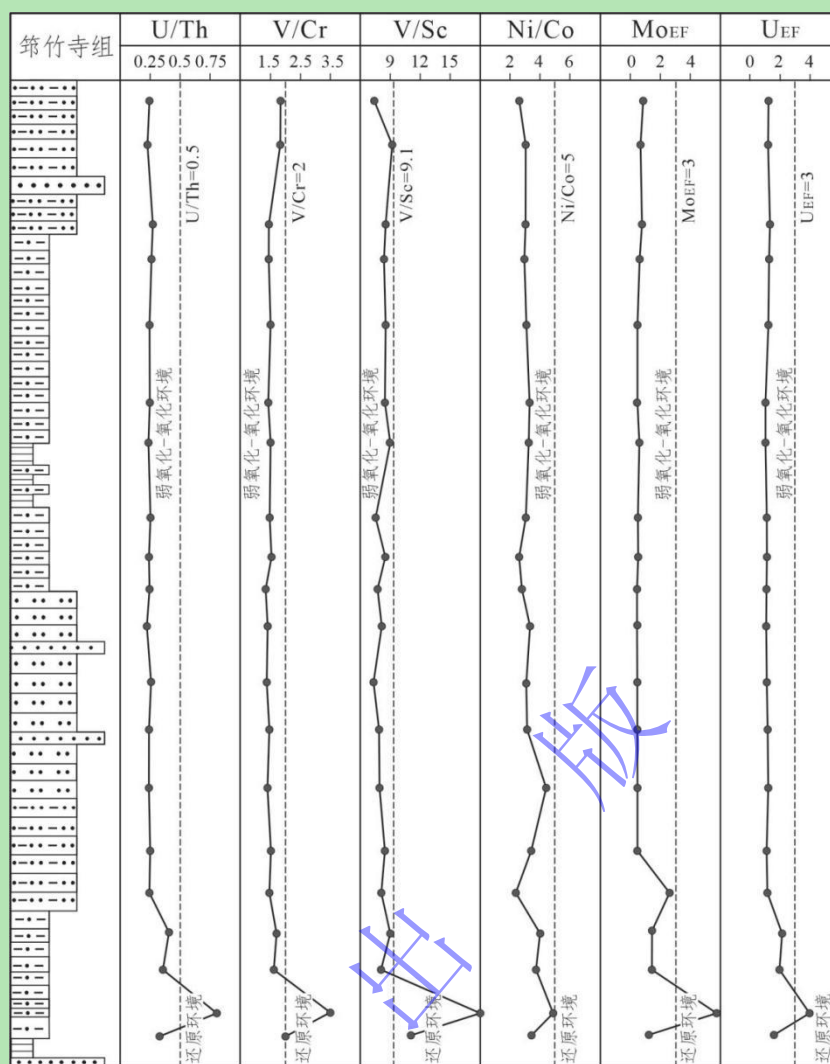


图 8 饮马池剖面筇竹寺组微量元素比值及元素富集系数垂向变化图

Fig.8 Geochemical profiles of trace element ratios and Mo and U enrichment factors for the Qiongzhusi Formation, Yinmachi section

4.1.3 沉积成岩环境的热液作用

受热液活动影响的沉积成岩环境，其沉积物中的微量元素会出现富集或亏损，故可通过沉积物/岩的微量元素丰度来检验沉积成岩环境是否受到热液作用的影响。沉积岩全岩 Ba/Sr、Co/Zn、La/Ce 等元素比值是敏感的热液活动指数 (Zhang *et al.*, 2019)。受热液作用强烈影响的沉积岩，其全岩 Ba/Sr 比值一般大于 1 (Peter and Scott, 1988)，Co/Zn 平均值约为 0.15 (夏威等, 2017)，La/Ce 比值小于 1 (Ganeshram *et al.*, 1995)。饮马池样品 Ba/Sr 比值介于 9.04~16.2 (平均值为 12.8)，Co/Zn 平均值为 0.18，La/Ce 比值介于 0.48~0.57 (平均值为 0.53)，反映了饮马池样品在沉积成岩过程中可能受到热液作用的强烈影响。

此外，Zn、Ni 和 Cu 元素易富集于热水沉积物，Co 元素则富集于水成沉积物 (Xu *et al.*, 2022)，故 Zn-Ni-Co 三角图 (Choi and Hariya, 1992) 和 Fe-Mn-(Cu+Co+Ni)*10 三角图 (Crerar

et al., 1982) 也可用于分析沉积成岩过程中所受到的热液作用。饮马池样品的投影均落入热水沉积物范围 (图 9); 锌厂沟样品和乌龙村样品的投点亦基本落入热水沉积物范围, 表明滇中地区早寒武世筇竹寺期的沉积成岩环境普遍受到热液作用影响。

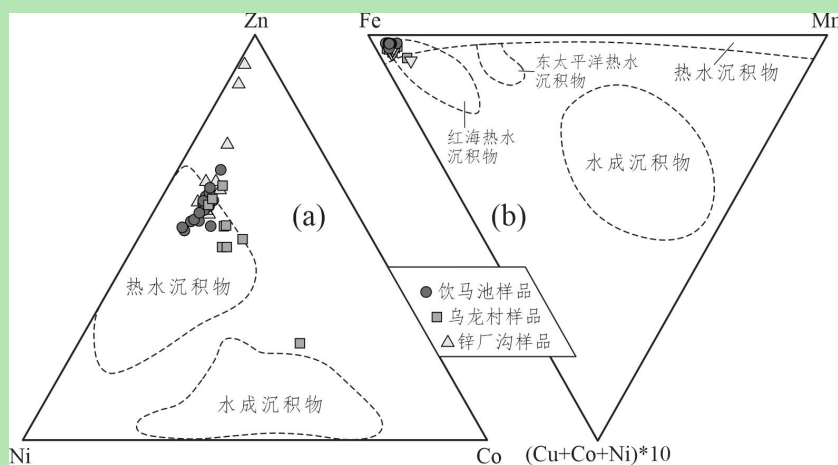


图 9 筇竹寺组沉积岩 Zn-Ni-Co 三角图 (a) 和 Fe-Mn-(Cu+Co+Ni)*10 三角图 (b) (据 Choi and Hariya, 1992; Crerar *et al.*, 1982 修改)

Fig.9 Ternary plots for Qiongzhusi sedimentary rocks: (a) Zn-Ni-Co; (b) Fe-Mn-(Cu+Co+Ni)*10 (modified from Choi and Hariya, 1992; Crerar *et al.*, 1982)

前人研究发现, 沉积于浅海陆棚环境的滇中地区下寒武统沉积岩地层中保存了若干层凝灰岩 (云南省自然资源厅, 2023), 其记录的火山喷发年龄为 535~518 Ma (Compston *et al.*, 2008; Zhu *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2018, 2020)。这些凝灰岩可能来自扬子西缘 (滇中地区及邻区) 或远方大陆火山喷发的火山灰。扬子西缘陆续报道的早古生代岩浆岩 (Hu *et al.*, 2018; Deng *et al.*, 2025) 一定程度上支持这些火山灰是扬子西缘岩浆活动的产物, 因此可认为扬子西缘 535~518 Ma 岩浆活动为滇中地区筇竹寺组的沉积成岩作用提供了热水环境。

4.2 源岩风化特征及源区古气候

沉积岩主量元素组合 $Al_2O_3-CaO+Na_2O-K_2O$ (简称 ACNK) 可反映其源岩的风化类型和强度 (Nesbitt and Young, 1984, 1989)。沉积岩在成岩过程中一般会经历钾的交代作用, 导致沉积岩 K_2O 含量比原始沉积物更高。因此, 在利用 ACNK 分析源岩之前, 需先对沉积岩中的 K_2O 含量进行校正 (McLennan *et al.*, 1993)。对饮马池样品进行 K_2O 校正 (校正方法见附表 1), 基于校正后的 K_2O_{corr} 与其他主量元素计算风化参数, 最后投点到 ACNK-CIA 协同图解上, 20 件样品均落入强烈化学风化的范围 (图 10a)。锌厂沟样品和乌龙村样品经相同的 K_2O 校正后投点到 ACNK-CIA 协同图上, 乌龙村粉砂岩样品落入强烈化学风化范围, 锌厂沟泥页岩样品落入中等化学风化范围 (图 10a)。三组样品的岩性组合及风化特征符合正常风化趋势 (姜在兴等, 2013), 饮马池和乌龙村粉砂岩中的黏土矿物主要由源岩中的斜长石风化而成, 而锌厂沟泥页岩中的黏土矿物包含由源岩机械搬运的黏土矿

物和由源岩中斜长石风化产生的黏土矿物两大类。

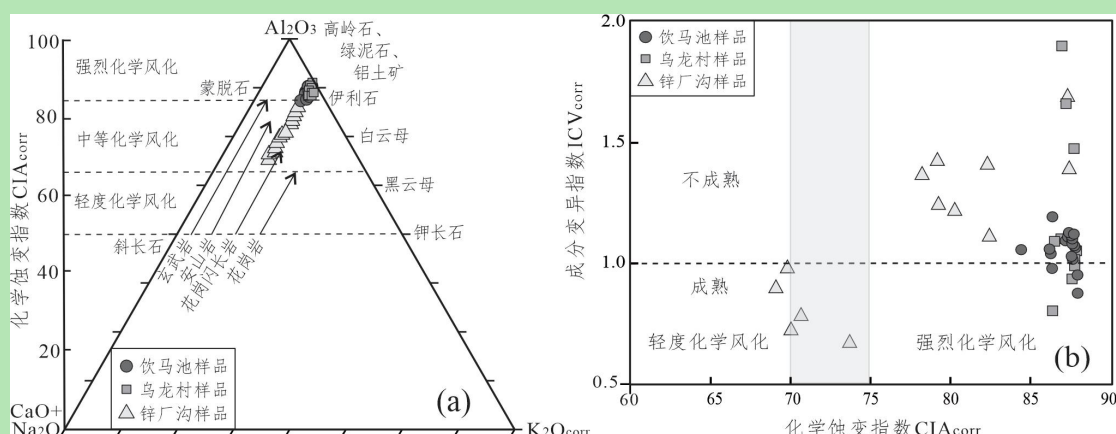


图 10 筓竹寺组沉积岩 ACNK-CIA 协同图 (a) 和 CIA-ICV 协同图 (b) (据 Nesbitt and Young, 1984; Cox *et al.*, 1995 修改)

K_2O_{corr} 是未发生钾交代作用的 K_2O 含量, CIA_{corr} 和 ICV_{corr} 分别是利用未发生钾交代作用的 K_2O 含量计算而得的化学蚀变指数和成分变异指数, 具体计算公式见附表 1

Fig.10 Bivariate plots for Qiongzhusi sedimentary samples: (a) ACNK vs CIA; (b) ICV vs CIA (modified from Nesbitt and Young, 1984; Cox *et al.*, 1995)

K_2O_{corr} = corrected values of K_2O ; CIA_{corr} = chemical index of alteration, using K_2O_{corr} values for calculation; ICV_{corr} = index of compositional variability, using K_2O_{corr} values for calculation. Calculation formula can be found in Supplementary Table 1

从成分变异指数 (Index of Compositional Variability, ICV) 和化学风化指数 (Chemical Index of Alteration, CIA) 协同图上来看, 绝大多数饮马池、乌龙村粉砂岩样品的 ICV 值和 CIA 值均较高 (图 10b), 说明这些粉砂岩样品的矿物成熟度不高, 尚处于早期风化阶段, 但早期风化即经历强烈的化学风化作用 (李绪龙等, 2022)。锌厂沟泥页岩样品在 ICV-CIA 协同图上的分布以高 ICV、高 CIA 为主, 也包括少量低 ICV、低 CIA 样品 (图 10b), 说明大多数锌厂沟泥页岩样品也以早期风化即经历强烈化学风化为主要特征。

前人研究认为, 源区母岩的风化程度与母岩类型、源区古气候和古地貌等因素密切相关 (Garzanti and Resentini, 2016; 李绪龙等, 2022)。风化早期即经历强烈化学风化作用, 说明源区处于温暖湿润的气候条件, 且源区构造活跃、地形抬升快 (Algeo *et al.*, 2011)。源区沉积环境的古温度可通过沉积岩 CIA_{corr} 值计算获取 (Yang *et al.*, 2014)。此次利用饮马池样品计算出源区古温度为 $21.6^{\circ}C \sim 23.6^{\circ}C$ (平均值为 $23.1^{\circ}C$, 附表 1), 前人利用乌龙村样品计算出的源区古温度为 $22.7^{\circ}C \sim 23.8^{\circ}C$ (杨永祯等, 2024), 共同指示了滇中地区筓竹寺组沉积岩的源区处于温暖的气候环境。有学者通过古地磁研究结果计算出寒武纪扬子板块处于南半球低纬度地区, 具有温暖的气候条件 (Yang *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2015), 这与本文解释的气候环境相一致。

4.3 源岩类型及物源分析

从沉积岩回溯源岩类型的首要步骤是去除沉积再旋回作用的影响。沉积岩的成分变异指数是判断沉积再旋回的一个有效指标。一般来说, $ICV > 1$ 的沉积岩, 其矿物成熟度低, 多来自源岩的初次风化; $ICV < 1$ 的沉积岩, 其矿物成熟度高, 多是沉积再旋回的产物 (Borges *et al.*, 2008)。滇中地区三组筇竹寺样品中, $ICV > 1$ 的样品共有 32 件, 包括 17 件饮马池样品、7 件乌龙村样品和 8 件锌厂沟样品 (图 10b)。 $Th/Sc-Zr/Sc$ 二元图是判断沉积再旋回的另一个有效指标。当全岩 Th/Sc 比值和 Zr/Sc 比值呈线性正相关 (沿沉积分异趋势线演化), 指示沉积岩多来自源岩的初次风化; 当 Zr 含量增加、 Zr/Sc 比值增大, 全岩 Th/Sc 比值和 Zr/Sc 比值不呈线性正相关 (偏离沉积分异趋势线), 则表明沉积岩是沉积再旋回的产物 (McLennan *et al.*, 1993)。滇中地区 17 件饮马池样品和 7 件乌龙村样品 (锌厂沟样品无 Sc 元素数据) 基本落在 $Th/Sc-Zr/Sc$ 二元图的沉积分异趋势线附近 (图 11a), 说明它们是源岩初次风化的产物。据此, 以下仅对这 32 件筇竹寺组样品的源岩组成进行讨论。

沉积岩的全岩 Ti 和 Al 元素可用于识别源岩性质 (Schieber, 1992), $TiO_2-Al_2O_3$ 二元图显示, 32 件筇竹寺组样品的源岩以中酸性岩浆岩为主 (图 11b)。基于主量元素 $F1-F2$ 判别函数二元图 (Roser and Korsch, 1988), 32 件筇竹寺组样品的源岩还包含富石英的沉积岩 (图 11c)。元素 Ti 和 Zr 在沉积岩风化、搬运和沉积过程中均十分稳定, 因此 TiO_2-Zr 二元图解可有效识别源岩的基性/酸性组分的相对比例 (Hayashi *et al.*, 1997), 该图解指示 32 件筇竹寺样品的源岩以酸性岩浆岩组分为主 (图 11d)。 La 、 Th 、 Hf 、 Co 、 La 和 Sc 等不活泼微量元素可进一步追溯源岩性质 (Long *et al.*, 2012; 杨永祯等, 2024)。元素 La 、 Th 、 Hf 赋存于长英质岩石, 元素 Sc 、 Cr 、 Co 多保存于铁镁质岩石, 因此 $La/Th-Hf$ 和 $La/Sc-Co/Th$ 二元图可揭示源岩中镁铁质/长英质组分的相对比例 (Floyd and Leveridge, 1987; McLennan *et al.*, 1993)。从 $La/Th-Hf$ 二元图可知, 饮马池样品落在长英质源区, 乌龙村和锌厂沟样品则落在长英质源区和长英质—玄武质混合源区 (图 12a)。从 $La/Sc-Co/Th$ 二元图可知, 饮马池样品集中分布于长英质 TTG 源岩, 乌龙村样品相对分散地分布于安山岩—TTG 源岩 (图 12b)。综上所述, 32 件筇竹寺组样品的源岩以长英质岩浆岩和富石英的沉积岩为主, 并含少量中基性岩浆岩组分。

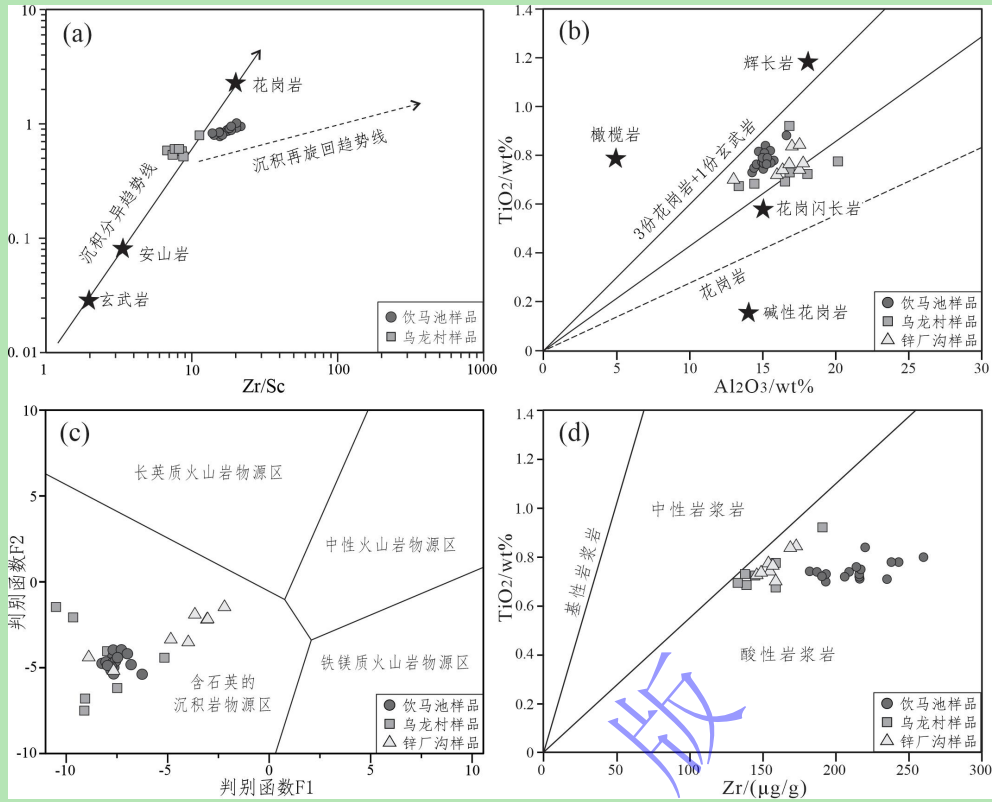


图 11 筲竹寺组沉积岩的源岩类型元素判别图解

(a) Zr/Sc-Th/Sc 二元图 (据 McLennan *et al.*, 1993 修改); (b) Al₂O₃-TiO₂ 二元图 (据 Schieber, 1992 修改); (c) 判别函数 F1-F2 二元图, 判别函数 F1 = (-1.773*TiO₂) + (0.607*Al₂O₃) + (0.76*^TFe₂O₃) + (-1.5*MgO) + (0.616*CaO) + (0.509*Na₂O) + (-1.224*K₂O) + (-9.090); 判别函数 F2 = (0.445*TiO₂) + (0.07*Al₂O₃) + (-0.25*^TFe₂O₃) + (-1.142*MgO) + (0.438*CaO) + (1.475*Na₂O) + (1.426*K₂O) + (-6.861), 据 Roser and Korsch, 1988 修改; (d) Zr-TiO₂ 二元图 (据 Hayashi *et al.*, 1997 修改)

Fig. 11 Discrimination plots of source rock types for the Qiongzhusi sedimentary rocks

(a) Zr/Sc-Th/Sc bivariate plot (modified from McLennan *et al.*, 1993); (b) Al₂O₃-TiO₂ bivariate plot (modified from Schieber, 1992); (c) discrimination function F1-F2 bivariate plot, where F1 = (-1.773*TiO₂) + (0.607*Al₂O₃) + (0.76*^TFe₂O₃) + (-1.5*MgO) + (0.616*CaO) + (0.509*Na₂O) + (-1.224*K₂O) + (-9.090); F2 = (0.445*TiO₂) + (0.07*Al₂O₃) + (-0.25*^TFe₂O₃) + (-1.142*MgO) + (0.438*CaO) + (1.475*Na₂O) + (1.426*K₂O) + (-6.861) (modified from Roser and Korsch, 1988); (d) Zr-TiO₂ bivariate plot (modified from Hayashi *et al.*, 1997)

恢复物源区, 首先需考虑岩相古地格局 (冯增昭, 2016)。早寒武世时期, 扬子西缘自西向东依次出露康滇古陆、滨岸、近岸浅海陆棚、远岸浅海陆棚和大陆斜坡 (刘宝珺和许效松, 1994; 冯增昭等, 2002), 碎屑物质显然应由西侧的古陆向东侧的陆棚和陆坡搬运 (图 1a)。现今康滇古陆所在位置报道了诸多前寒武纪岩浆岩和变沉积岩露头, 包括大量 860~750 Ma 花岗岩类 (Li *et al.*, 2003; Zhou *et al.*, 2006; Zhao and Zhou, 2007)、少量 1.8~1.6 Ga 花岗岩类和基性岩 (周邦国等, 2012; 刘军平等, 2020)、少量 1.8~0.8 Ga 变质硅质碎屑岩 (高林志等, 2018; 何世军等, 2023)。从岩相古地理的角度推测, 康滇古陆的这些岩石露头可能于早寒武世也出露地表, 遭受风化剥蚀, 向东侧浅海陆棚环境中的筲竹寺组提供碎屑物质 (图 1a)。这一推论也得到前人发表论据的支撑: 滇中地区寒武纪沉积岩中含有 860~750

Ma 和 1.8~1.6 Ga 碎屑锆石 (Yao *et al.*, 2022), 且 860~750 Ma 碎屑锆石和康滇古陆 860~750 Ma 花岗岩类中的岩浆锆石具有相似的锆石 Hf-O 同位素特征 (Yang *et al.*, 2015; Yao *et al.*, 2022)。这说明, 以 860~750 Ma 花岗岩类为代表的康滇古陆本地岩石是滇中筇竹寺组沉积岩重要的物质来源。

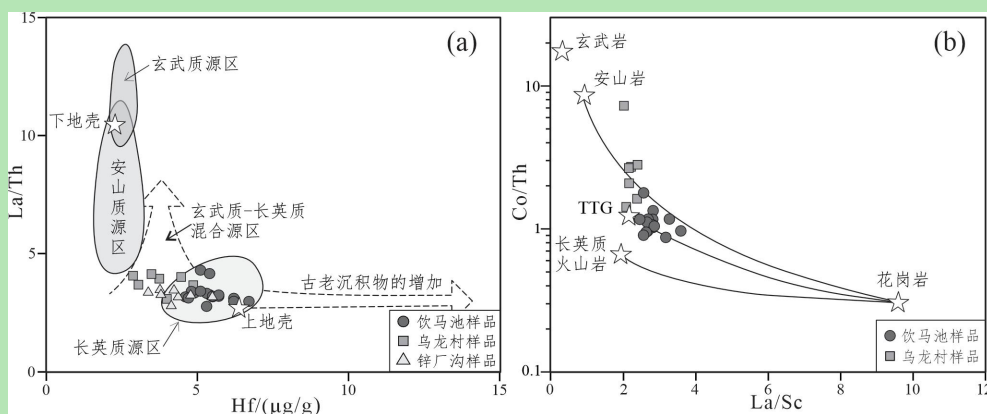


图 12 筇竹寺组沉积岩的源岩类型微量元素判别图

(a) La/Th-Hf 二元图 (据 Floyd and Leveridge, 1987 修改); (b) La/Sc-Co/Th 二元图 (据 McLennan *et al.*, 1993 修改)

Fig.12 Trace element discrimination plots of source rock types for Qiongzhusi sedimentary rocks

(a) La/Th-Hf bivariate plot (modified from Floyd and Leveridge, 1987); (b) La/Sc-Co/Th bivariate plot (modified from McLennan *et al.*, 1993)

一个需要思考的问题是, 康滇古陆本地岩石是筇竹寺组沉积岩的唯一物源吗? 从前文有关沉积岩主微量元素分析可推测出源区母岩的物质组成, 但无法推测母岩的年龄组成。前人已发表的碎屑锆石数据或许可以提供一些信息: 滇中地区寒武纪沉积岩中不仅有 860~750 Ma 和 1.8~1.6 Ga 碎屑锆石, 更包含大量 525~520 Ma 碎屑锆石 (Yang *et al.*, 2020; Yao *et al.*, 2022)。这些 525~520 Ma 碎屑锆石具有明显的冈瓦纳岩浆岩属性, 被认为来源于位于扬子西缘西侧的冈瓦纳大陆同时期花岗岩类 (Yang *et al.*, 2020; Yao *et al.*, 2022)。据此, 本文推测冈瓦纳大陆 525~520 Ma 花岗岩类可能也是滇中地区筇竹寺组重要的物质来源之一。

4.4 源区大地构造背景

沉积岩的化学组成可反映源岩的平均化学成分, 而影响源岩化学成分的一个重要因素是源区大地构造背景 (Bhatia, 1983, 1985; Bhatia and Crook, 1986)。矿物成熟度低 (ICV>1) 的细粒沉积岩, 其化学组成最接近源岩的平均化学成分, 是源区大地构造分析的理想对象 (Roser and Korsch, 1986)。从滇中地区筇竹寺组沉积岩样品中选择 32 件 ICV>1 的样品 (图 10b) 进行主量元素、微量元素和稀土元素的源区构造背景分析。

主量元素结果显示 (附表 1), 32 件样品的 Ti、Al、Mg 和 Fe 元素含量均较高, 符合杂基含量高、成分成熟度低的特征; Na 和 Ca 元素含量较低, 符合其在强烈风化和搬运过程中淋滤流失的特征; K 元素含量较高, 符合其经历过钾的成岩交代作用特征。将 32 件样品

投点到两类常用的主量元素构造背景二元判别图上 (Bhatia, 1983), 发现样品基本落入大洋岛弧及邻区 (图 13)。

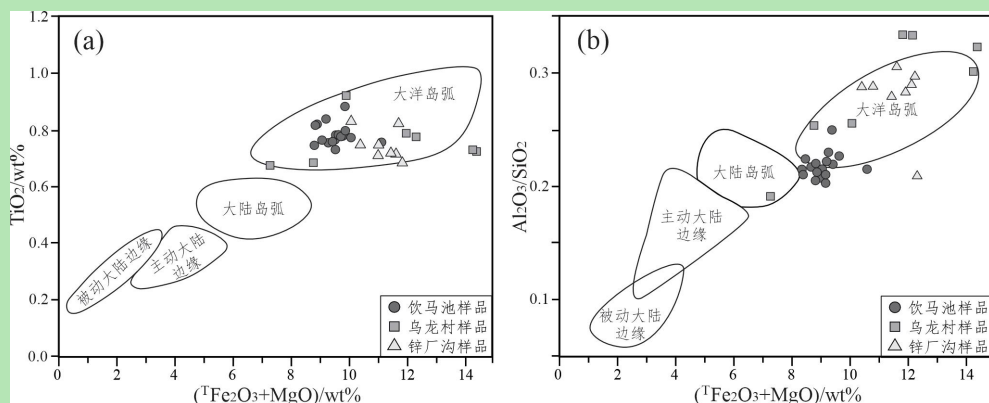


图 13 筇竹寺组沉积岩的源区构造环境主量元素判别图解 (据 Bhatia, 1983 修改)

(a) $(\text{TFe}_2\text{O}_3+\text{MgO})-\text{TiO}_2$ 二元图; (b) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2-(\text{TFe}_2\text{O}_3+\text{MgO})$ 二元图

Fig.13 Major element discrimination plots for tectonic settings of the source region of Qiongzhusi sedimentary rocks (modified from Bhatia, 1983)

(a) $(\text{TFe}_2\text{O}_3+\text{MgO})$ vs. TiO_2 bivariate plot; (b) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ vs. $(\text{TFe}_2\text{O}_3+\text{MgO})$ bivariate plot

这两类主量元素二元判别图是否适用于本文研究呢? 首先, 需对该类判别图 (图 13) 中的关键参数 (Ti、Al、Fe 和 Mg 元素) 的活动性进行评估。一般来说, Ti 和 Al 元素从源岩到沉积岩的过程均十分稳定 (Calvert and Pedersen, 2007)。Fe 元素在沉积过程中的表现却极不稳定。氧化型沉积环境下, 水体中的 Fe 元素以难溶的赤铁矿和针铁矿形式进入沉积岩, 使沉积岩的 Fe 元素含量较之源岩更高; 反之, 还原性沉积环境下, 沉积岩的 Fe 含量较之源岩更低 (Raiswell and Canfield, 2012)。类似地, Mg 元素在风化、沉积和成岩过程中的表现也不稳定。风化过程中, Mg 元素极易从源岩中淋滤流失并进入水体。沉积成岩过程中, 一部分 Mg 元素被黏土矿物吸附回到沉积岩中, 一部分 Mg 元素则留在水体。因此, 沉积岩的 Mg 元素含量几乎不能反映源岩的 Mg 含量 (Mackenzie and Garrels, 1966)。据此, 我们认为通过该类判别图得出筇竹寺组母岩来源于大洋岛弧源区的可能性较小。

那么, 沉积岩的微量元素和稀土元素可以有效地反映源区的大地构造背景信息吗? 前人研究认为, 细粒沉积岩中的微量元素 Zr、Th、La 和 Sc 是极其稳定的元素组合, Th/Sc 和 Zr/Sc 等元素比值可有效区分物源区的构造背景 (Taylor and McLennan, 1988; McLennan *et al.*, 1990)。细粒沉积岩中的稀土元素一般赋存于锆石、独居石、磷钇矿和榍石等副矿物, 在表生环境中基本不发生变化 (Henderson, 1984)。虽然稀土元素的绝对总量可能因物理分选发生改变, 但轻重稀土分异程度和 δEu 却非常稳定 (Bhatia and Crooks, 1986; McLennan, 1989)。综合运用这些微量元素和稀土元素特征, 可以高度可靠地分析物源区大地构造特征 (Cullers, 1994)。

由微量元素 Zr、Th、La 和 Sc 组合构成的 La-Th-Sc 和 Th-Sc-Zr/10 三角图可有效区分物源区的大洋岛弧、大陆岛弧、活动大陆边缘和被动大陆边缘等构造背景 (Bhatia and Crook, 1986; McLennan *et al.*, 1993)。17 件饮马池样品和 7 件乌龙村样品 (锌厂沟样品无 Sc 元素数据) 在 La-Th-Sc 三角图 (图 14a) 和 Th-Sc-Zr/10 三角图 (图 14b) 的投点均落入大陆岛弧范围。

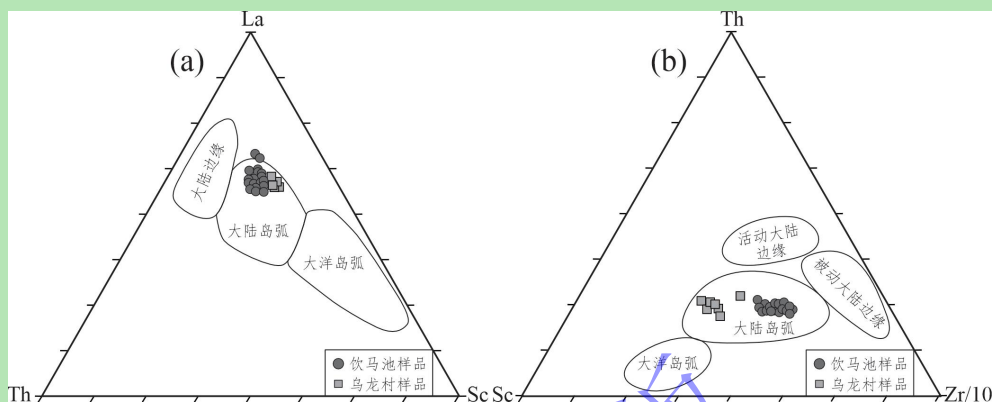


图 14 筇竹寺组沉积岩的源区构造环境微量元素判别图解 (据 Bhatia and Crook, 1986 修改)

(a) La-Th-Sc 三角图; (b) Th-Sc-Zr/10 三角图

Fig.14 Trace element discrimination plots for tectonic settings of the source region of Qiongzhusi sedimentary rocks (modified from Bhatia and Crook, 1986)

(a) La-Th-Sc ternary plot; (b) Th-Sc-Zr/10 ternary plot

前人对不同构造背景下细粒沉积岩的稀土元素特征进行了总结 (Henderson, 1984; Bhatia, 1985; Taylor *et al.*, 1986; McLennan, 1989)。一般来说, 被动大陆边缘构造背景下, 沉积岩的物源主要是古老大陆地壳, LREE 强烈富集, Eu 元素强负异常, δEu 值约为 0.50~0.65。大洋岛弧构造背景下, 沉积岩的物源主要是新生岛弧火山岩, LREE 与 HREE 基本无分异, Eu 元素基本无异常, δEu 值约为 0.85~1.10。大陆岛弧构造背景下, 沉积岩的物源是新生岛弧火山岩和古老大陆地壳的混合物, LREE 中等富集, Eu 元素弱负异常, δEu 值约为 0.75~0.95。主动大陆边缘构造背景下, 沉积岩的物源包括新生岛弧岩浆岩、古老大陆地壳、弧前弧后盆地中的再旋回沉积物, LREE 中等—强富集, Eu 元素中等负异常, δEu 值约为 0.65~0.75。

利用 LREE 与 HREE 分异程度、 δEu 值等对滇中地区 32 件筇竹寺组样品的源区构造背景做进一步约束。17 件饮马池样品(La/Yb)_n 比值介于 0.54~1.25, δEu 值介于 0.62~0.67 (附表 3); 7 件乌龙村样品(La/Yb)_n 比值介于 0.83~1.13, δEu 值介于 0.57~0.74 (杨永祯等, 2024), 8 件锌厂沟样品(La/Yb)_n 比值介于 0.86~1.10, δEu 值介于 0.73~0.84 (刘建清等, 2021), 基本符合主动大陆边缘的特征。从稀土元素配分模式图可以更清晰地对比三组筇竹寺组样品与不同构造源区之间的稀土元素特征 (图 15)。与大陆岛弧 REE 曲线相比, 筇竹寺组样品

REE 曲线右倾程度更小、更平缓, Eu 元素处的沟谷更明显, 说明箬竹寺组沉积岩更富集轻稀土元素, 源岩有古老大陆地壳物质的混入物。前文源岩类型分析认为, 滇中地区箬竹寺组沉积岩的源岩以长英质岩浆岩和硅质沉积岩为主, 并含少量中基性岩浆岩组分。主动大陆边缘构造背景下, 新生岛弧岩浆岩和弧前盆地可提供长英质岩浆岩和少量中基性岩浆岩组分, 弧后盆地和古老大陆地壳可提供硅质沉积岩物源。本文认为滇中地区箬竹寺组沉积岩的源区可能处于一个具有多物源特征的主动大陆边缘。

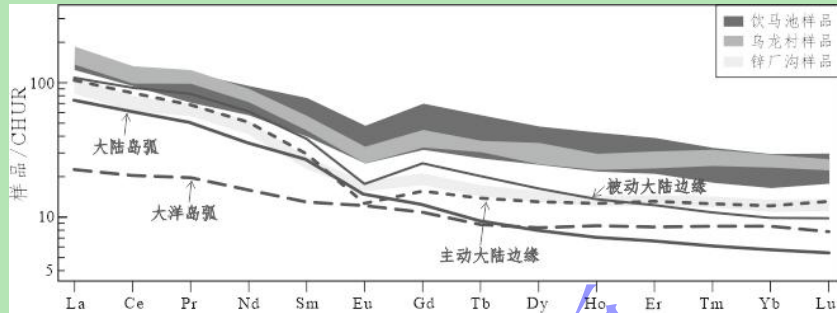


图15 滇中地区箬竹寺沉积岩样品稀土元素配分模式图(CHUR 稀土元素数据来源于 Taylor and McLennan, 1985, 不同构造背景源区的稀土元素数据来源于 Bhatia, 1985)

Fig.15 CHUR-normalized rare earth element pattern of selected sedimentary rock samples from central Yunnan region (geochemical data for CHUR from Taylor and McLennan, 1985; rare earth element data for different tectonic settings from Bhatia, 1985)

根据古陆—大陆架—大陆斜坡的古地理格局、沉积岩主量元素构造判别图解等, 学者们一般认为早寒武世扬子西缘处于被动大陆边缘 (许效松等, 2010; 刘建清等, 2021; 杨永祯等, 2024)。但是, 近年来诸多研究工作根据岩浆岩记录、沉积盆地恢复和碎屑物源分析等, 陆续提出早寒武世扬子西缘可能与冈瓦纳大陆相邻, 处于一个主动大陆边缘 (Chen *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2020; Yao *et al.*, 2022; Deng *et al.*, 2025; Wang *et al.*, 2025)。考虑到挤压型构造环境也可以发育古陆—大陆架—大陆斜坡的地理格局 (解习农和任建业, 2013), 且沉积岩主量元素构造判别图的可靠性还有待商榷 (Calvert and Pedersen, 2007; Raiswell and Canfield, 2012), 因此本文更倾向支持主动大陆边缘的源区构造解释。

前人研究显示, 滇中地区寒武纪沉积岩中具冈瓦纳属性的 525~520 Ma 碎屑锆石远比具康滇古陆属性的 860~750 Ma 碎屑锆石多 (Yang *et al.*, 2020; Yao *et al.*, 2022)。由此可以推测, 冈瓦纳大陆 525~520 Ma 花岗岩类更可能是滇中箬竹寺组的主要源区岩石, 因此从箬竹寺组沉积岩微量和稀土元素推测的源区构造环境即早寒武世时期的源区构造环境。诚然, 从细粒碎屑岩全岩地球化学特征到源区大地构造背景的推论有较多限定条件。关于早寒武世扬子西缘滇中地区是否处于一个主动大陆边缘, 仍需更多地质学工作的验证。

5 结论

(1) 滇中地区筇竹寺组细粒沉积岩形成于一个以氧化型水体为主的近岸浅海陆棚环境, 沉积成岩过程中可能受到热液活动的影响。

(2) 滇中地区筇竹寺组的源岩以酸性岩浆岩和富石英的硅质沉积岩为主, 含少量中基性岩浆岩组分。源岩在早期风化阶段即经历强烈的化学风化作用。

(3) 筇竹寺组的源岩区包含本土的康滇古陆和外来的冈瓦纳大陆。早寒武世康滇古陆(及扬子西缘)处于温暖湿润的古气候环境, 并可能处于主动大陆边缘的构造环境。

支撑本研究的科学数据(附表 1、附表 2 和附表 3)已在中国科学院科学数据银行(Science Data Bank) ScienceDB 平台公开发布, 访问地址为 <https://doi.org/10.57760/sciencedb.36469> 和 <https://cstr.cn/31253.11.sciencedb.36469>。

致谢 感谢中山大学地球科学与工程学院云南澄江实习基地王正海、钱鑫、甘成势、李志刚、师超凡、田云涛、文一雄、张恩、张逸鹏、张玉芝等老师和 2022 级本科生在野外工作中提供的帮助。四位审稿专家和编辑部老师对本文进行了严格而细致地审理, 并提出了许多建设性意见, 在此表示衷心的感谢!

参考文献 (References)

- 冯增昭. 2016. 论古地理图[J]. 古地理学报, 18(3): 285-314. [Feng Zengzhao. 2016. On palaeogeographic map[J]. Journal of Palaeogeography, 18(3): 285-314.]
- 冯增昭, 彭勇民, 金振奎, 等. 2002. 中国早寒武世岩相古地理[J]. 古地理学报, 4(1): 1-12. [Feng Zengzhao, Peng Yongmin, Jin Zhenkui, et al. 2002. Lithofacies palaeogeography of the Early Cambrian in China[J]. Journal of Palaeogeography, 4(1): 1-12.]
- 付修根, 胡广, 韦恒叶, 等. 2024. 沉积地球化学方法[M]. 北京: 科学出版社: 1-208. [Fu Xiugen, Hu Guang, Wei Hengye, et al. 2024. Sedimentary geochemical methods[M]. Beijing: Science Press: 1-208.]
- 高林志, 张恒, 张传恒, 等. 2018. 滇东昆阳群地层序列的厘定及其在中国地层表的位置[J]. 地质论评, 64(2): 283-298. [Gao Linzhi, Zhang Heng, Zhang Chuanheng, et al. 2018. Collate and stipulate the sequences of the Mesoproterozoic Kunyang Group in eastern Yunnan and its position in stratigraphic column of China[J]. Geological Review, 64(2): 283-298.]
- 何世军, 杨仕潘, 刘军平, 等. 2023. 扬子西南缘易门地区~1.4 Ga 岩浆事件的厘定及其对菜子园-易门洋演化的指示[J]. 地质论评, 69(6): 2375-2390. [He Shijun, Yang Shipan, Liu Junping, et al. 2023. Determination of ~1.4 Ga magmatic event in the Yimen area on the southwestern margin of the Yangtzeblock and its indication to the evolution of Caiziyuan-Yimen Ocean[J]. Geological Review, 69(6): 2375-2390.]
- 姜在兴, 梁超, 吴靖, 等. 2013. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J]. 石油学报, 34(6): 1031-1039. [Jiang Zaixing, Liang Chao, Wu Jing, et al. 2013. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks[J]. Acta Petroli Sinica, 34(6): 1031-1039.]
- 解习农, 任建业. 2013. 沉积盆地分析基础[M]. 武汉: 中国地质大学出版社: 1-408. [Xie Xinong, Ren Jianye. 2013. Principles of sedimentary Basin analysis[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press: 1-408.]
- 李绪龙, 张霞, 林春明, 等. 2022. 常用化学风化指标综述: 应用与展望[J]. 高校地质学报, 28(1): 51-63. [Li Xulong, Zhang Xia, Lin Chunming, et al. 2022. Overview of the application and prospect of common chemical weathering indices[J]. Geological Journal of China Universities, 28(1): 51-63.]
- 刘宝珺, 许效松. 1994. 中国南方岩相古地理图集: 震旦纪—三叠纪[M]. 北京: 科学出版社: 1-188. [Liu Baojun, Xu Xiaosong. 1994. Atlas of lithofacies and paleogeography of South China[M]. Beijing: Science Press: 1-188.]

- 刘建清, 何利, 何平, 等. 2021. 康滇古陆东缘筇竹寺组地球化学特征及意义: 以云南省昭通市昭阳区锌厂沟剖面为例[J]. 沉积学报, 39(5): 1305-1319. [Liu Jianqing, He Li, He Ping, et al. 2021. Geochemical characteristics and significance of the Qiongzhusi Formation on the eastern margin of the ancient Kangding-Yunnan land: Taking the Xinchanggou section of Zhaoyang district, Zhaotong city, Yunnan province as an example[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(5): 1305-1319.]
- 刘军平, 王晓峰, 王小虎, 等. 2020. 滇中甸中地区中二叠世晚期镁铁—超镁铁质岩体特征及其与峨眉地幔柱关系: 来自锆石 U-Pb 年龄及岩石地球化学证据[J]. 地质论评, 66(5): 1284-1298. [Liu Junping, Wang Xiaofeng, Wang Xiaohu, et al. 2020. Characteristics of the Late Middle Permian mafic—ultramafic rocks in Dianzhong area, central Yunnan, and their relationship with the Emei Mantle Plume: Evidence from zircon U-Pb age and petrogeochemistry[J]. *Geological Review*, 66(5): 1284-1298.]
- 牟传龙, 周恩恩, 梁薇, 等. 2011. 中上扬子地区早古生代烃源岩沉积环境与油气勘探[J]. 地质学报, 85(4): 526-532. [Mu Chuanlong, Zhou Kenen, Liang Wei, et al. 2011. Early Paleozoic sedimentary environment of hydrocarbon source rocks in the Middle-Upper Yangtze region and petroleum and gas exploration[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(4): 526-532.]
- 夏威, 于炳松, 王运海, 等. 2017. 黔北牛蹄塘组和龙马溪组沉积环境及有机质富集机理: 以 RY1 井和 XY1 井为例[J]. 矿物岩石, 37(3): 77-89. [Xia Wei, Yu Bingsong, Wang Yunhai, et al. 2017. Study on the depositional environment and organic accumulation mechanism in the Niutitang and Longmaxi Formation, North Guizhou province: A case study of Well Renye 1 and Well Xiye 1[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 37(3): 77-89.]
- 许效松, 门玉澎, 张海全. 2010. 古陆、古隆与古地理[J]. 沉积与特提斯地质, 30(3): 1-10. [Xu Xiaosong, Men Yupeng, Zhang Haiquan. 2010. Old land, old uplift and palaeogeography[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 30(3): 1-10.]
- 杨永祯, 郭岭, 方泽鑫, 等. 2024. 康滇古陆东缘筇竹寺组沉积物源的风化特征: 以云南省楚雄市武定县乌龙村剖面为例[J]. 沉积学报, 42(1): 324-341. [Yang Yongzhen, Guo Ling, Fang Zexin, et al. 2024. Weathering characteristics of sedimentary source area of Qiongzhusi Formation, eastern margin of ancient Kangding-Yunnan land: Case study of the Wulongcun section of Wuding district, Chuxiong city, Yunnan province, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 42(1): 324-341.]
- 云南省自然资源厅. 2023. 1:5 万区域地质调查报告: 澄江县幅, 百灵寺幅[M]. 北京: 地质出版社: 1-110. [Department of Nature Resources of Yunnan Province. 2023. 1:50000 Regional geological survey and report of the Chengjiangxian sheet and Bailingsi sheet[M]. Beijing: Geology Press: 1-110.]
- 周邦国, 王生伟, 孙晓明, 等. 2012. 云南东川望厂组熔结凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其意义[J]. 地质论评, 58(2): 359-368. [Zhou Bangguo, Wang Shengwei, Sun Xiaoming, et al. 2012. SHRIMP U-Pb age and its significance of zircons in welded tuff of Wangchang Formation in Dongchuan area, Yunnan province, SW China[J]. *Geological Review*, 58(2): 359-368.]
- Algeo T J, Kuwahara K, Sano H, et al. 2011. Spatial variation in sediment fluxes, redox conditions, and productivity in the Permian-Triassic Panthalassic Ocean[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 308(1/2): 65-83.
- Algeo T J, Tribouillard N. 2009. Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum-uranium covariation[J]. *Chemical Geology*, 268(3/4): 211-225.
- Bhatia M R, Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(2): 181-193.
- Bhatia M R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. *The Journal of Geology*, 91(6): 611-627.
- Bhatia M R. 1985. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: Provenance and tectonic control[J]. *Sedimentary Geology*, 45(1/2): 97-113.
- Borges J B, Huh Y, Moon S, et al. 2008. Provenance and weathering control on river bed sediments of the eastern Tibetan Plateau and the Russian Far East[J]. *Chemical Geology*, 254(1/2): 52-72.
- Calvert S E, Pedersen, T F. 2007. Elemental proxies for palaeoclimatic and palaeoceanographic variability in marine sediments: Interpretation and application[J]. *Developments in Marine Geology*, 1: 567-644.
- Chen Q, Sun M, Long X P, et al. 2018. Provenance study for the Paleozoic sedimentary rocks from the west Yangtze Block: Constraint on possible link of South China to the Gondwana supercontinent reconstruction[J]. *Precambrian Research*, 309: 271-289.
- Choi J H, Hariya Y. 1992. Geochemistry and depositional environment of Mn oxide deposits in the Tokoro Belt, northeastern Hokkaido, Japan[J]. *Economic Geology*, 87(5): 1265-1274.

- Compston W, Zhang Z C, Cooper J A, et al. 2008. Further SHRIMP geochronology on the Early Cambrian of South China[J]. *American Journal of Science*, 308(4): 399-420.
- 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[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(14): 2919-2940.
- Crerar D A, Namson J, Chyi M S, et al. 1982. Manganiferous cherts of the Franciscan assemblage; I, General geology, ancient and modern analogues, and implications for hydrothermal convection at oceanic spreading centers[J]. *Economic Geology*, 77(3): 519-540.
- Cullers R L. 1994. The controls on the major and trace element variation of shales, siltstones, and sandstones of Pennsylvanian-Permian age from uplifted continental blocks in Colorado to platform sediment in Kansas, USA[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(22): 4955-4972.
- Deng Q, Wang Z J, Liu H, et al. 2025. Subduction-collision and rapid uplift of the NW Yangtze Block during the Ediacaran-Cambrian transition: New evidence from the shoshonite series[J]. *International Geology Review*, 67(3): 331-351.
- Floyd P A, Leveridge B E. 1987. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho Basin, South Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones[J]. *Journal of the Geological Society*, 144(4): 531-542.
- Ganeshram R S, Pedersen T F, Calvert S E, et al. 1995. Large changes in oceanic nutrient inventories from glacial to interglacial periods[J]. *Nature*, 376(6543): 755-758.
- Garzanti E, Resentini A. 2016. Provenance control on chemical indices of weathering (Taiwan river sands)[J]. *Sedimentary Geology*, 336: 81-95.
- Hayashi K I, Fujisawa H, Holland H D, et al. 1997. Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(19): 4115-4137.
- Henderson P. 1984. Rare earth element geochemistry[M]. Amsterdam: Elsevier: 1-510.
- Herron M M. 1988. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 58(5): 820-829.
- Hu P Y, Zhai Q G, Ren G M, et al. 2018. Late Ordovician high-Mg adakitic andesite in the western South China block: Evidence of oceanic subduction[J]. *International Geology Review*, 60(9): 1140-1154.
- Kimura H, Watanabe Y. 2001. Oceanic anoxia at the Precambrian-Cambrian boundary[J]. *Geology*, 29(11): 995-998.
- Li X H, Li Z X, Ge W C, et al. 2003. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma?[J]. *Precambrian Research*, 122(1/2/3/4): 45-83.
- Liu S G, Deng B, Li Z Q, et al. 2024. The Qiongzhusi-Dengying petroleum system in the Sichuan Basin, China[J]. *AAPG Bulletin*, 108(4): 663-689.
- Long X P, Yuan C, Sun M, et al. 2012. Geochemistry and Nd isotopic composition of the Early Paleozoic flysch sequence in the Chinese Altai, Central Asia: Evidence for a northward-derived mafic source and insight into Nd model ages in accretionary orogen[J]. *Gondwana Research*, 22(2): 554-566.
- Mackenzie F T, Garrels R M. 1966. Chemical mass balance between rivers and oceans[J]. *American Journal of Science*, 264(7): 507-525.
- McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, et al. 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics[C]//Johnsson M J, Basu A. Processes controlling the composition of clastic sediments. Colorado, Geological Society of America Special Paper., 21-40.
- McLennan S M, Taylor S R, McCulloch M T, et al. 1990. Geochemical and Nd Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: Crustal evolution and plate tectonic associations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(7): 2015-2050.
- McLennan S M. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks; Influence of provenance and sedimentary processes[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 21(1): 169-200.
- Nesbitt H W, Young G M. 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(7): 1523-1534.
- Nesbitt H W, Young G M. 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles[J]. *The Journal of Geology*, 97(2): 129-147.

- Peter J M, Scott S D. 1988. Mineralogy, composition, and fluid inclusion microthermometry of sea-floor hydrothermal deposits in the southern trough of Guaymas Basin, Gulf of California[J]. *The Canadian Mineralogist*, 26(3): 567-587.
- Raiswell R, Canfield D E. 2012. The iron biogeochemical cycle past and present[J]. *Geochemical Perspectives*, 1(1): 1-220.
- Roser B P, Korsch R J. 1986. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio[J]. *The Journal of Geology*, 94(5): 635-650.
- Roser B P, Korsch R J. 1988. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data[J]. *Chemical Geology*, 67(1/2): 119-139.
- Schieber J. 1992. A combined petrographical—geochemical provenance study of the Newland Formation, Mid-Proterozoic of Montana[J]. *Geological Magazine*, 129(2): 223-237.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. *The continental crust: Its composition and evolution*[M]. London: Blackwell Scientific Publications: 1-312.
- Taylor S R, McLennan S M. 1988. The significance of the rare earths in geochemistry and cosmochemistry[J]. *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*, 11: 485-578.
- Taylor S R, Rudnick R L, McLennan S M, et al. 1986. Rare earth element patterns in Archean high-grade metasediments and their tectonic significance[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(10): 2267-2279.
- Tribouillard N, Algeo T J, Baudin F, et al. 2012. Analysis of marine environmental conditions based on molybdenum–uranium covariation—Applications to Mesozoic paleoceanography[J]. *Chemical Geology*, 324-325: 46-58.
- Wang Q Y, Wang Z J, Liu J H, et al. 2025. Depositional sequence and detrital zircon age spectra from Ediacaran to Early Cambrian at the northwestern Yangtze craton: Implication for the Basin dynamics[J]. *Precambrian Research*, 417: 107667.
- Wang X W, Zhang J C, Zhao R R, et al. 2023. Siliceous origin of the Cambrian Qiongzhusi Formation shale in the Middle part of the Upper Yangtze platform: Significance of organic matter enrichment[J]. *ACS Omega*, 8(28): 25358-25369.
- Wignall P B, Twitchett R J. 1996. Oceanic anoxia and the end Permian mass extinction[J]. *Science*, 272(5265): 1155-1158.
- Xu C, Shan X L, Lin H M, et al. 2022. The Formation of Early Eocene organic-rich mudstone in the western Pearl River Mouth Basin, South China: Insight from paleoclimate and hydrothermal activity[J]. *International Journal of Coal Geology*, 253: 103957.
- Yang C, Li X H, Li Z X, et al. 2020. Provenance evolution of age-calibrated strata reveals when and how South China Block collided with Gondwana[J]. *Geophysical Research Letters*, 47(19): e2020GL090282.
- Yang C, Li X H, Wang X C, et al. 2015. Mid-Neoproterozoic angular unconformity in the Yangtze Block revisited: Insights from detrital zircon U-Pb age and Hf-O isotopes[J]. *Precambrian Research*, 266: 165-178.
- Yang C, Li X H, Zhu M Y, et al. 2018. Geochronological constraint on the Cambrian Chengjiang biota, South China[J]. *Journal of the Geological Society*, 175: 659-666.
- Yang J H, Cawood P A, Du Y S, et al. 2014. Global continental weathering trends across the Early Permian glacial to postglacial transition: Correlating high-and low-paleolatitude sedimentary records[J]. *Geology*, 42(10): 835-838.
- Yang Z Y, Sun Z M, Yang T, et al. 2004. A long connection (750-380 Ma) between South China and Australia: Paleomagnetic constraints[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(3/4): 423-434.
- Yao W H, Zhu X Y, Wang J, et al. 2022. Position of South China and Indochina along northern Gondwana margin during the Ediacaran-Silurian Period[J]. *Precambrian Research*, 379: 106809.
- Zhai L N, Wu C D, Ye Y T, et al. 2018. Fluctuations in chemical weathering on the Yangtze Block during the Ediacaran–Cambrian transition: Implications for paleoclimatic conditions and the marine carbon cycle[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 490: 280-292.
- Zhang S H, Li H Y, Jiang G Q, et al. 2015. New paleomagnetic results from the Ediacaran Doushantuo Formation in South China and their paleogeographic implications[J]. *Precambrian Research*, 259: 130-142.
- Zhang Y, Horsfield B, Hou D J, et al. 2019. Impact of hydrothermal activity on organic matter quantity and quality during deposition in the Permian Dalong Formation, southern China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 110: 901-911.
- Zhao J H, Zhou M F. 2007. Neoproterozoic adakitic plutons and arc magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South

China[J]. The Journal of Geology, 115(6): 675-689.

Zhou M F, Ma Y X, Yan D P, et al. 2006. The Yanbian terrane (southern Sichuan province, SW China): A Neoproterozoic arc assemblage in the western margin of the Yangtze Block[J]. Precambrian Research, 144(1/2): 19-38.

Zhu R X, Li X H, Hou X G, et al. 2009. SIMS U-Pb zircon age of a tuff layer in the Meishucun section, Yunnan, southwest China: Constraint on the age of the Precambrian-Cambrian boundary[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 52(9): 1385-1392.

Geochemical Features and Geological Implications of the Early Cambrian Qiongzhusi Formation in the Central Yunnan Region

ZHONG YaoQi¹, YAO WeiHua^{1,2}, REN RuiYue¹, KUSUMANINGRUM Heni¹, HE WenKang^{1,3}

1. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai, Guangdong 519080, China

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Geodynamics and Geohazards, Zhuhai, Guangdong 519080, China

3. Wushan Copper Deposit, Jiangxi Copper Corporation Limited, Ruichang, Jiangxi 332204, China

Abstract: [Objectives] The early Cambrian Qiongzhusi Formation in the western Yangtze Block is a good reservoir for shale gas, and it has been well targeted for shale gas exploration in the Sichuan Basin. Conversely, shale gas deposits in central Yunnan are under-explored. To provide geological support for shale gas exploration in central Yunnan, this study focused on siliciclastic rocks of the early Cambrian Qiongzhusi Formation, and investigated their sedimentary and diagenetic environment, source rocks, the nature of weathering, paleoclimate and tectonic setting of their source regions. [Methods] For the Yinmachi section of the Liangwangshan area in particular, stratigraphic logging of the section, microscopic petrography and whole-rock geochemistry of Qiongzhusi Formation rocks were investigated. [Results] The Qiongzhusi siliciclastic samples are mainly siltstones with low compositional maturity. The analyzed siltstone samples yielded U/Th ratios of 0.23–0.81, V/Cr ratios of 1.38–3.56, V/Sc ratios of 7.36–18.9, Ni/Co ratios of 2.34–4.85, Ba/Sr ratios of 9.04–16.2, La/Ce ratios of 0.48–0.57, (La/Yb)_n ratios of 0.54–1.25 and δEu values of 0.62–0.67. [Conclusions] Considered together with published data for Qiongzhusi siltstones and mudstones in central Yunnan, it is concluded that the Qiongzhusi Formation was predominantly sourced from felsic magmatic rocks and siliceous sedimentary rocks, with minor mafic components. After chemical weathering and transportation, the detritus was deposited in oxic conditions on a shallow marine continental shelf and were influenced by hydrothermal fluids during sedimentation and diagenesis. Source regions of the detritus possibly include local Kangdian Old Land and exotic Gondwana continents. During the early Cambrian, source regions (including the western Yangtze) were probably located at an active continental margin with a warm, humid climate.

Key words: central Yunnan; early Cambrian Qiongzhusi Formation; sedimentary environment; weathering and paleoclimate; provenance

Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42472146; Natural Science Foundation of Guangdong Province, No. 2024A1515010778; Teaching Quality Engineering Projects of Sun Yat-sen University, No. 2023520; College Students' Innovation and Entrepreneurship Training Program, No. 20250200

Corresponding author: YAO WeiHua, E-mail: yaowh5@mail.sysu.edu.cn