第 27 卷　第 6 期
2025 年　12 月

古　地　理　学　报
JOURNAL OF PALAEOGEOGRAPHY（Chinese Edition）

Vol. 27　No. 6
Dec.　2025

文章编号：1671-1505(2025)06-1452-14　　**DOI**:10.7605/gdlxb.2025.080

岩石学证据约束四川盆地及邻区上奥陶统五峰组观音桥层形成过程*

周晓峰[1,2]　郭　伟[3]　李熙喆[3]　梁萍萍[3]　杨竣麟[1]　李士博[1]

1 中国石油大学（北京）石油工程学院，北京 102249
2 油气资源与工程全国重点实验室，中国石油大学（北京），北京 102249
3 中国石油勘探开发研究院，北京 100083

摘　要　通过岩心、光学显微镜、电子探针显微镜、MAPS 技术等有序衔接提供的岩石学证据，约束四川盆地及邻区上奥陶统五峰组观音桥层的形成过程。结果表明，观音桥层的形成过程划分为沉积作用和埋藏成岩作用 2 个子过程和 7 个阶段。沉积作用子过程依次经历滨岸重力流、浅水重力流、深水砂泥质碎屑流等 3 个阶段；埋藏成岩作用子过程的 4 个阶段总体表现为强烈的压实和压溶作用以及沉积有机质转化为富孔隙和无孔隙的焦沥青。融合岩石学特征，将观音桥层表征为由滨岸碎屑、浅水生屑、深水生屑、有机质等 4 个子系统形成的具有复杂结构的深水砂泥质碎屑流沉积。建议综合应用露头、岩心、光学显微镜、电子探针显微镜、MAPS 技术等有序衔接，开展华南甚至全球奥陶系—志留系界线地层的沉积环境和沉积相研究。

关键词　MAPS 技术　岩石学证据　深水砂泥质碎屑流　五峰组　奥陶系　四川盆地　观音桥层

第一作者简介　周晓峰，男，1973 年生，讲师，博士，主要从事油气田地质学教学和科研工作。E-mail：zhouxf@cup.edu.cn。

中图分类号：P588.2　　**文献标志码**：A

Formation process of the Guanyinqiao Bed of Upper Ordovician Wufeng Formation in Sichuan Basin and its adjacent area through petrological evidence

ZHOU Xiaofeng[1,2]　GUO Wei[3]　LI Xizhe[3]　LIANG Pingping[3]　YANG Junlin[1]　LI Shibo[1]

1 *College of Petroleum Engineering*, *China University of Petroleum* (*Beijing*), *Beijing* 102249, *China*
2 *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering*, *China University of Petroleum* (*Beijing*), *Beijing* 102249, *China*
3 *Research Institute of Petroleum Exploration & Development*, *PetroChina*, *Beijing* 100083, *China*

Abstract　Petrological evidence was acquired by orderly connections such as core, optical microscopy, electron probe microscopy and MAPS technology, in order to analyse the formation process of the Guanyinqiao Bed in the top of the Upper Ordovician Wufeng Formation in Sichuan Basin and its

* 国家重大科技专项“页岩气工业化建产区评价与高产主控因素研究”（编号：2017ZX05035004）资助。[Financially supported by the National Important Science and Technology Project “Evaluation of industrial production areas of shale gas and study on main control factors for high yield” (No. 2017ZX05035004)]

收稿日期：2024-11-22　　改回日期：2025-03-30

adjacent area. The results indicate that the formation process of the Guanyinqiao Bed was divided into two subprocesses and seven stages. The sedimentary subprocess went through three stages in sequence: gravity flow in shore, gravity flow in shallow sea and deep-water sandy-muddy debris flow. The four stages of the diagenetic subprocess were generally characterized by strong compaction and pressure solution, as well as the transformation of sedimentary organic matter into the porous pyrobitumen and the nonporous pyrobitumen. Based on integrating petrological features, the Guanyinqiao Bed was characterized as the deep-water sandy-muddy debris flow with complex structures formed by four subsystems: terrestrial clasts, shallow sea bioclasts, deep-water bio-clasts and organic matters. It is recommended to comprehensively apply outcrop, core, optical microscopy, electron probe microscopy and MAPS technology to systematically study the sedimentary environment and facies of the Ordovician-Silurian boundary strata in South China and even globally.

Key words　MAPS technology, petrological evidence, deep-water sandy-muddy debris flow, Wufeng Formation, Ordovician, Sichuan Basin, Guanyinqiao Bed

About the first author　ZHOU Xiaofeng, born in 1973, is a lecturer at the College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing). He is mainly engaged in teaching and research work in oil and gas geology. E-mail: zhouxf@cup.edu.cn.

1　概况

华南地区上奥陶统五峰组观音桥层（段）是奥陶系—志留系界线地层，厚度普遍不足 1 m，连续分布面积约 20×10^4 km^2（戎嘉余，1979；陈旭等，2000；戎嘉余等，2011；张琳娜等，2016）。观音桥层的形成环境一直悬而未决，概括起来主要有浅水成因说和深水成因说，浅水成因说强调浅水生物相（戎嘉余，1979；陈旭等，2000；戎嘉余等，2011；谢尚克等，2011；张琳娜等，2016；梁萍萍等，2022；时志强等，2024），深水成因说重视观音桥层与围岩突变接触和沉积不协调（徐论勋等，2004；高振中等，2008；沈均均等，2023）。综观以往研究成果发现，这 2 种成因说普遍认为观音桥层为富生屑的石灰岩、泥灰岩、灰质泥岩、白云岩，主要依据都是露头、岩心、岩石薄片，而少数文献依据丰富的全岩分析数据，确认四川盆地及邻区观音桥层的岩相为含有机质的钙质硅质页岩和硅质页岩（王玉满等，2016；沈均均等，2023）。以岩心、光学显微镜、电子探针显微镜、MAPS（Modular Automated Processing System）技术等多尺度多方法观测四川盆地及邻区观音桥层的岩石学特征，以系统论为指导将矿物成分复杂、颗粒粒径相差悬殊、泥级物质丰富的观音桥层表征为由滨岸碎屑、浅水生屑、深水生屑、有机质等 4 个子系统形成的具有复杂结构的深水砂泥质碎屑流沉积。

2　研究思路

以岩心、光学显微镜、电子探针显微镜、MAPS 技术的有序衔接，观察四川盆地及邻区 12 口井（图 1）观音桥层的岩石学特征，开展岩石学表征，剖析观音桥层的形成过程。MAPS 技术是将氩离子抛光面全部或部分划分为一系列规整网格，对每一个网格扫描成像，对所有网格的图像进行拼接，形成一幅二维大视域扫描图像数据体，在一定的范围内连续地放大或缩小图像数据体来得到典型纳米岩石图像（周晓峰等，2022a；Zhou *et al.*, 2024）。

在岩心观察（图 2-a 至图 2-i）的基础上，每口井选择 1 个深度段磨制宽×高为 5 cm×7 cm 的岩石薄片。应用光学显微镜可以清晰分辨岩石薄片中粗粉砂及更粗粒径的透明矿物，但不透明矿物或有机质的浸染状分布导致透明矿物的分辨率下降（图 2-j 至图 2-m）。选取黄 204 井、黄 205 井、威 231 井、自 305 井、宁 209 井的岩石薄片，应用电子探针显微镜采集典型微区的较高分辨率波谱图像和元素扫描图像，原位探测粗粒和细粒物质的组成（图 3；图 4；图 5；图 6）。筛选岩石学特征丰富的黄 205 井岩心，在制作岩石薄片的纵向切面上，对照光学显微镜和电子探针显微镜的岩石图像，采集 1 个长×宽×厚为 1 cm×1 cm×0.5 cm 的样品，制作氩离子抛光片，应用 MAPS 技术采集 4 nm 分辨率岩石图像数据体，用于观察细粒物质（矿物和有机

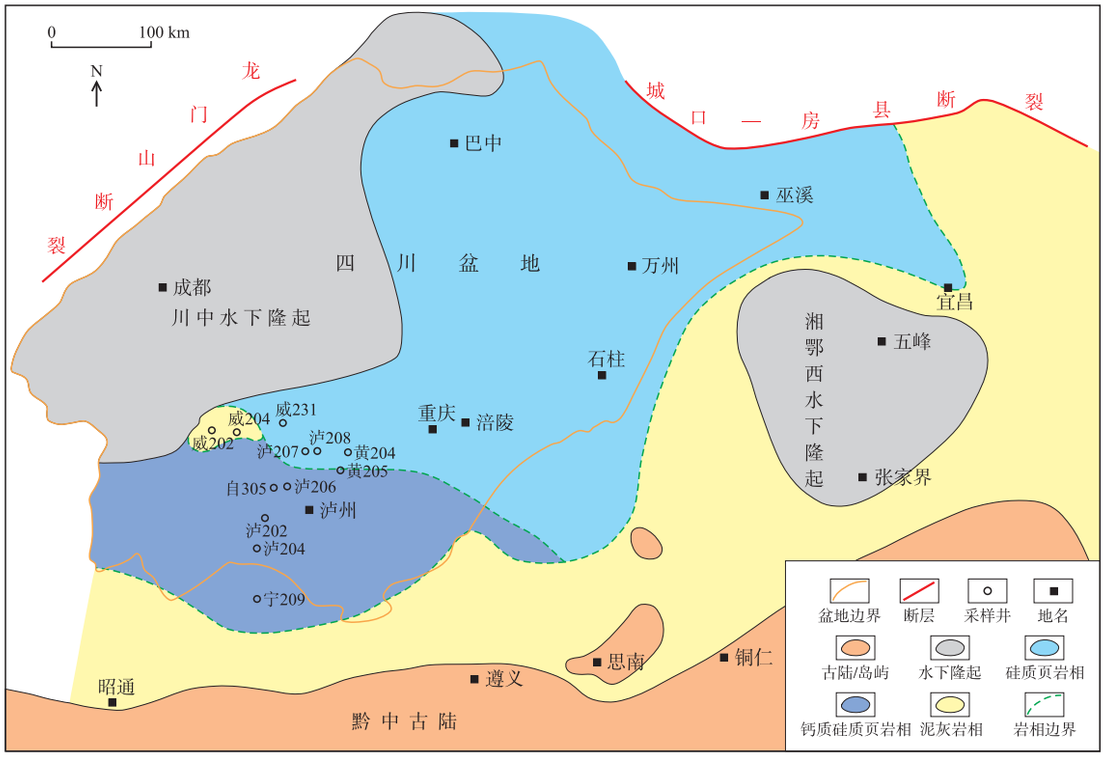


图 1 四川盆地及邻区观音桥层岩相分布图（据沈均均等，2023）

Fig. 1 Lithofacies distribution map of the Guanyinqiao Bed in Sichuan Basin and its adjacent area (after Shen *et al.*, 2023)

质）的赋存状态及与粗粒矿物的相互关系（图 7）。通过岩心、光学显微镜、电子探针显微镜和 MAPS 技术的有序衔接，为开展矿物成分复杂、颗粒粒径相差悬殊、泥级物质丰富的观音桥层的形成过程分析提供第一性资料。

岩石薄片的磨制由北京天和信矿业技术有限公司完成。岩石薄片镜下观察在中国石油大学（北京）油气资源与工程全国重点实验室完成，光学显微镜型号：Nikon LV4500POL。波谱图像和元素面扫描图像的采集在清华大学材料实验室完成，电子探针显微镜型号：JXA－8230。样品的氩离子抛光和 4 nm 分辨率 MAPS 岩石图像数据体的采集在中国石油勘探开发研究院廊坊分院国家能源页岩气研究和开发中心完成，氩离子抛光仪型号：Fischione Model 1060，扫描电镜型号：Fei Helios 650。

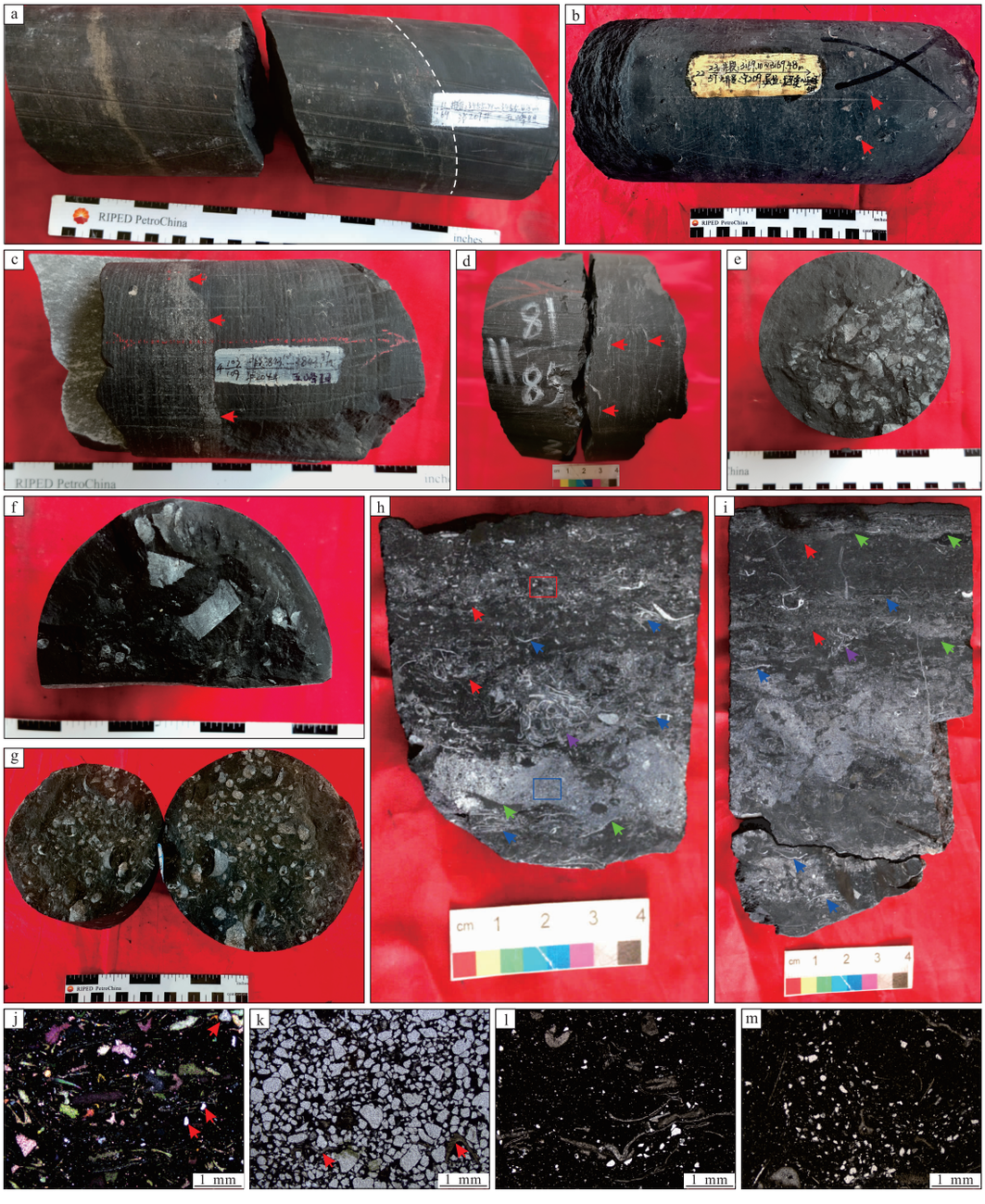
岩石薄片和氩离子抛光片的制作过程中，样品保持自然状态。镜下观察时，岩石薄片和氩离子抛光片处于水平状态，保证样品的顶端位于视域上方和底端位于视域下方，确保镜下观察到的矿物颗粒的赋存状态仅仅是自然现象的放大，这有助于描述地层条件下的岩石学特征以及压实作用信息。

观音桥层的组分主要为石英、方解石、白云石、含铁白云石、黏土、黄铁矿、有机质等（戎嘉余，1979；陈旭等，2000；徐论勋等，2004；高振中等，2008；戎嘉余等，2011；王玉满等，2016；张琳娜等，2016；梁萍萍等，2022；沈均均等，2023；时志强等，2024），通过电子探针显微镜波谱图像结合面扫描 C、Si、Ca、Mg、Al、Fe、S 等 7 种元素判识各组分的赋存状态（图 3；图 4；图 5；图 6）。元素面扫描图像中，黑色、绿色、蓝色、黄色、红色过渡到粉红色代表元素的含量逐渐升高。各组分中，石英 Si 含量最高，方解石 Ca 含量最高，黄铁矿 S 含量最高，粗粒碎屑石英、方解石依据 Si 和 Ca 面扫描图像相互配置很容易区分开来，Al 与 Mg、Fe 和/或 Ca 叠加区域为黏土矿物，C 面扫描图像的红色和粉红色微区为有机质，细粒物质因相互屏蔽而导致颜色降级。

3 结果分析

3.1 观音桥层岩石学特征

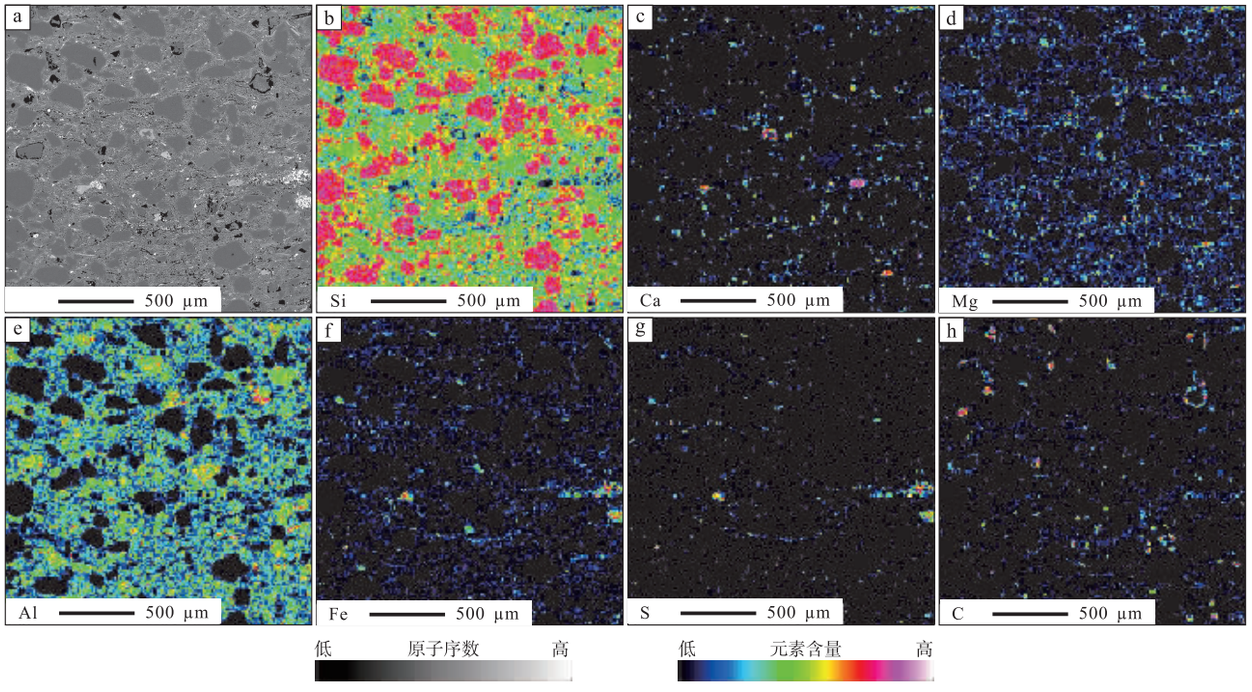
岩心、光学显微镜、电子探针显微镜和纳米岩



a—观音桥层与下伏黑色块状页岩突变接触（白色虚线分隔），观音桥层含丰富介屑和粗颗粒，下伏黑色块状页岩缺乏介屑和粗颗粒，泸 207 井，取心回次：11（11/69）；b—柱面上保存完整的 Hirnantia 薄壳，具细放射纹饰（红色箭头），宁 209 井，取心回次：22（33/57）；c—中上部有一介屑层，与下伏含介屑页岩突变接触（红色箭头），与上覆含介屑页岩渐变接触，泸 204 井，取心回次：4（103/109）；d—介壳（红色箭头）顺层排列，自 305 井，取心回次：11（81/85）；e，f，g—依次分别为图 a，b，c 观音桥层的横断面，介壳丰富；h—粗粒陆源石英和浅水介屑漂浮在细粒物质中，下部石英含量高，向上介屑含量高，粗颗粒疏密相间分布的微区过渡自然（红色箭头）或突变接触（绿色箭头），长条状介屑近水平排列（蓝色箭头）和杂乱堆积（紫色箭头），红色方框微区为图 j 的范围，蓝色方框微区为图 k 的范围，黄 204 井，井深 3610.19～3610.27 m；i—粗粒陆源石英和浅水介屑漂浮在细粒物质中，下部石英含量高，向上介屑含量高，粗颗粒疏密相间分布的微区过渡自然（红色箭头）或突变接触（绿色箭头），长条状介屑近水平排列（蓝色箭头）和杂乱堆积（紫色箭头），黄 205 井，井深 4225.74～4225.88 m；j—长条形、短棒状、不规则的介屑（方解石）和少量陆源石英碎屑（红色箭头）悬浮在细粒物质中，正交光；k—大小混杂的陆源石英碎屑和少量介屑（红色箭头）悬浮在细粒物质中，单偏光；l，m—陆源石英和浅水介屑悬浮在细粒物质中，单偏光

图 2　四川盆地及邻区观音桥层岩心和普通薄片的典型图像

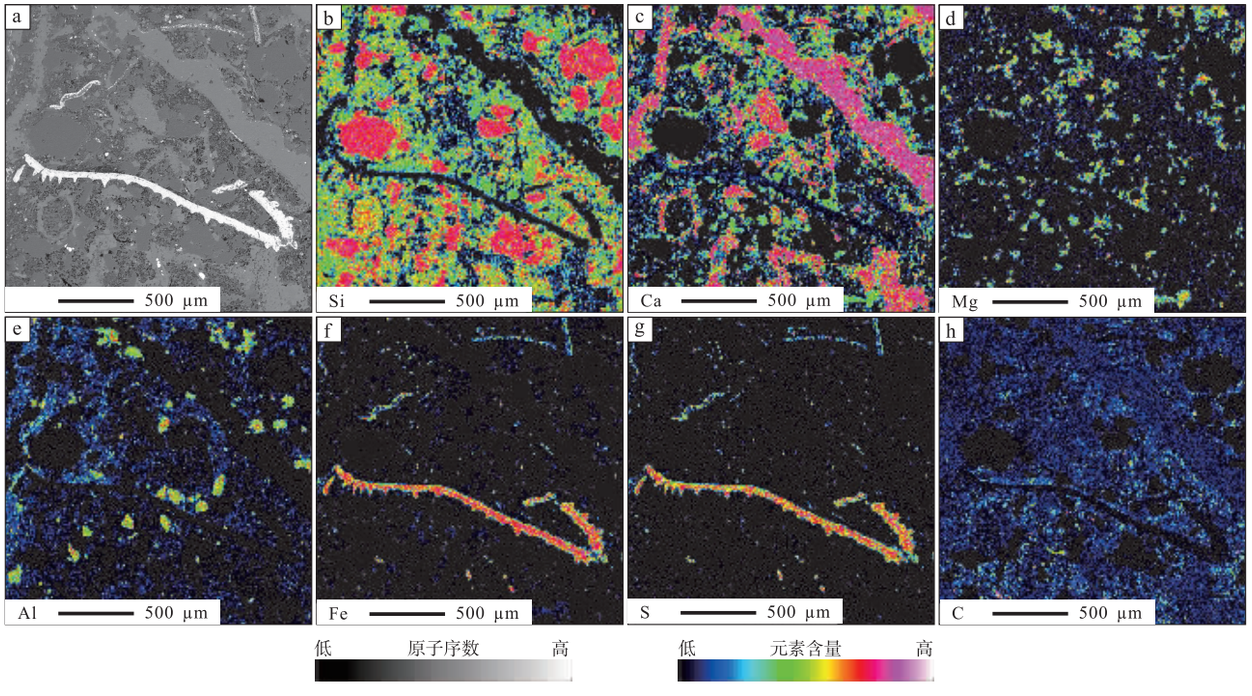
Fig. 2　Typical images of cores and thin sections of the Guanyinqiao Bed in Sichuan Basin and its adjacent area



a—波谱图像；b-h—依次为图 a 的 Si、Ca、Mg、Al、Fe、S、C 等元素面扫描图像

图 3 威 231 井观音桥层细粒物质支撑粗粒碎屑的波谱图像及元素面扫描图像

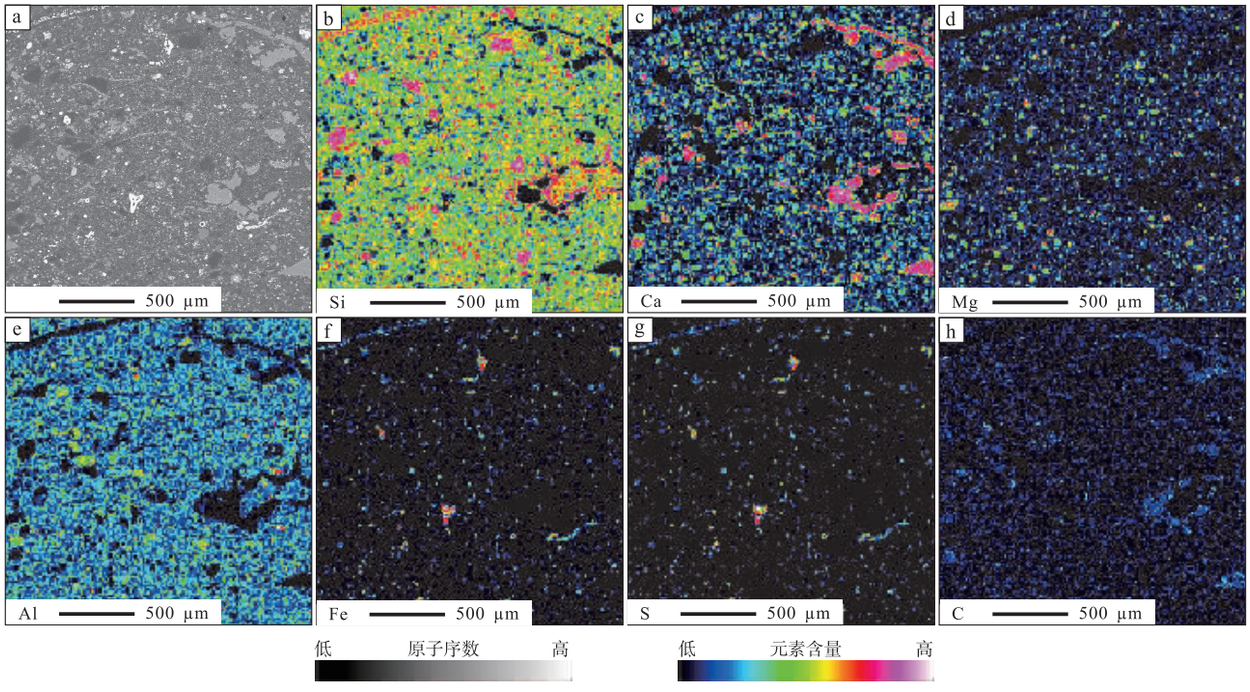
Fig. 3 Spectrum and element scanning images of fine grains supporting coarse clastics in the Guanyiqiao Bed of Well W 231



a—波谱图像；b-h—依次为图 a 的 Si、Ca、Mg、Al、Fe、S、C 等元素面扫描图像

图 4 黄 204 井观音桥层细粒物质和粗粒碎屑互相嵌合的波谱图像及元素面扫描图像

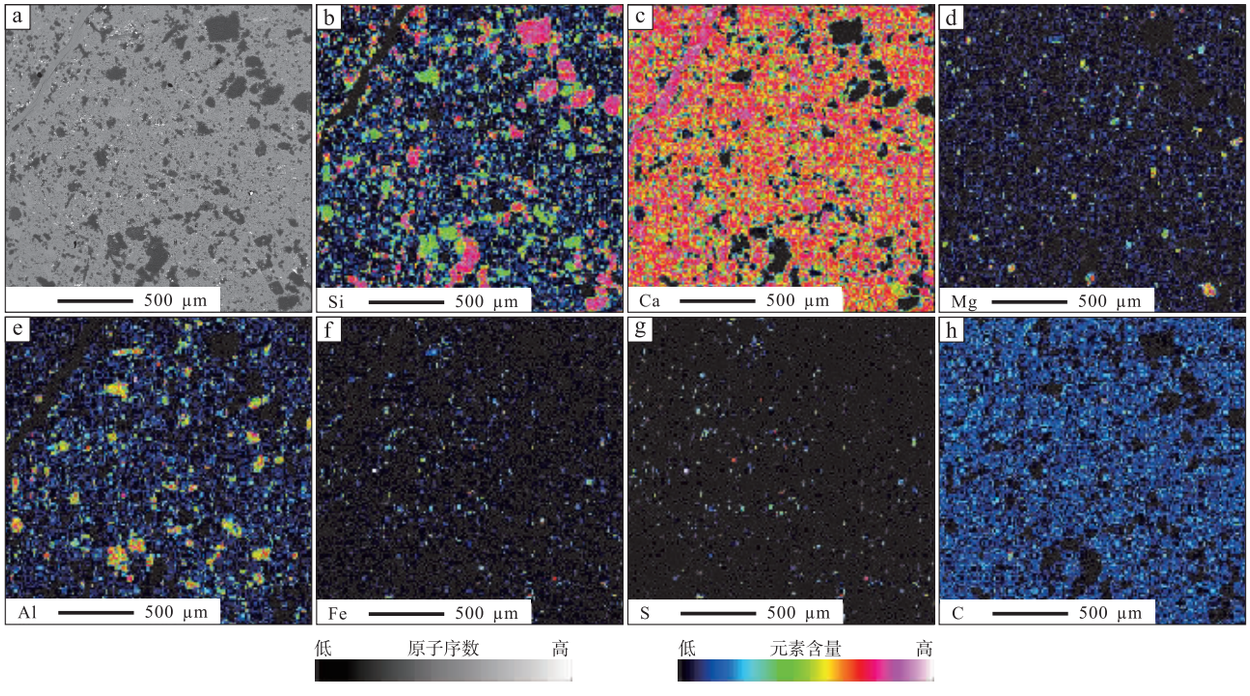
Fig. 4 Spectrum and element scanning images of fine grains interbedded with coarse clastics in the Guanyiqiao Bed of Well H 204



a—波谱图像；b-h—依次为图 a 的 Si、Ca、Mg、Al、Fe、S、C 等元素面扫描图像

图 5　自 305 井观音桥层粗粒碎屑漂浮在细粒物质中的波谱图像及元素面扫描图像

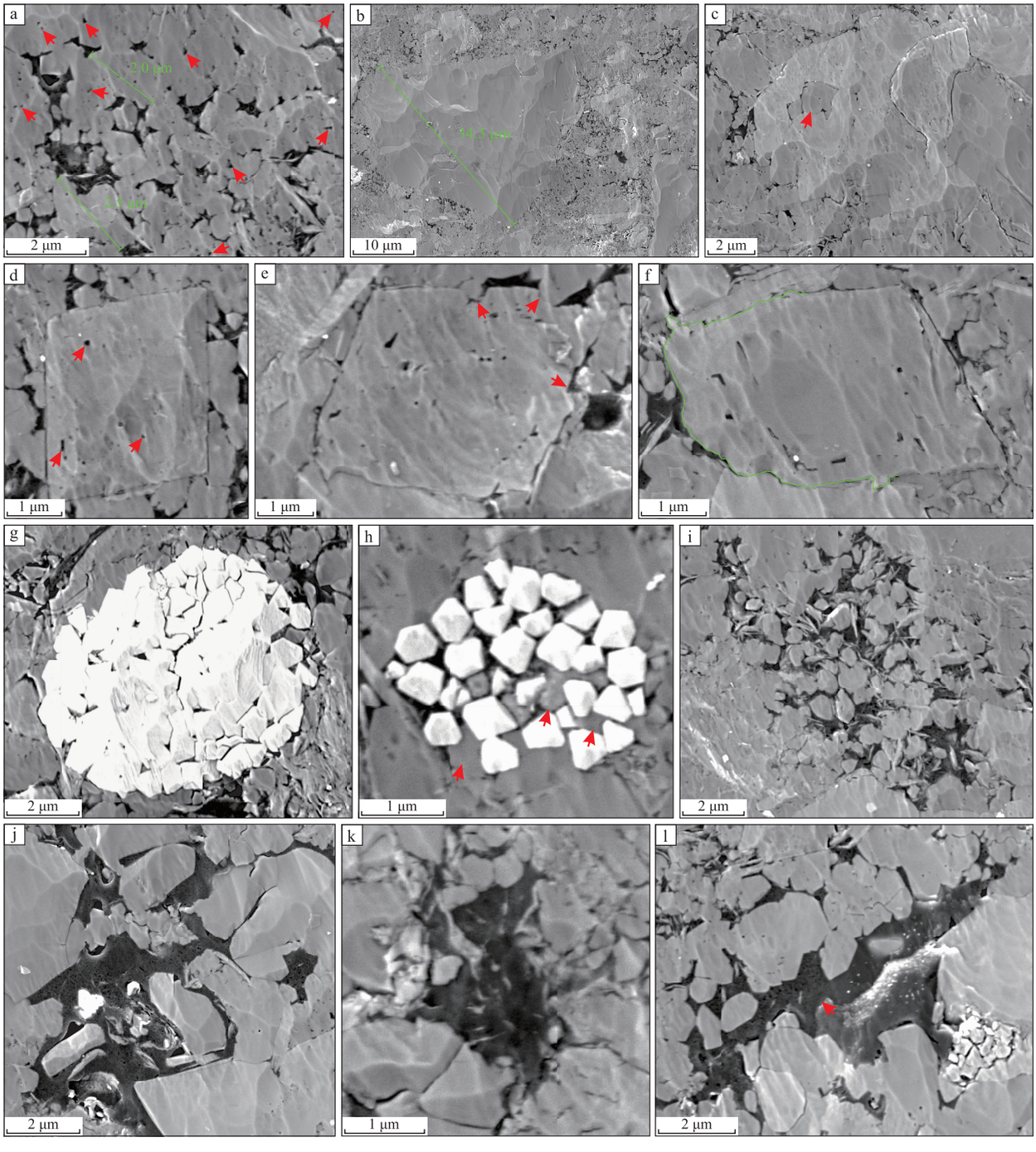
Fig. 5　Spectrum and element scanning images of coarse clastics floating in fine grains in the Guanyiqiao Bed of Well Z 305



a—波谱图像；b-h—依次为图 a 的 Si、Ca、Mg、Al、Fe、S、C 等元素面扫描图像

图 6　宁 209 井观音桥层粗粒碎屑漂浮在细粒物质中的波谱图像及元素面扫描图像

Fig. 6　Spectrum and element scanning images of coarse clastics floating in fine grains in the Guanyiqiao Bed of Well N 209



a—泥级石英颗粒相互融合为聚合体，粒内发育孔隙(红色箭头)；b—粉砂级石英颗粒，缺乏粒内孔隙；c—方解石溶蚀孔隙充填具有孔隙的泥级石英颗粒（红色箭头)；d—菱形白云石，粒内发育溶蚀孔隙(红色箭头)；e—菱形白云石，粒内发育溶蚀孔隙，边缘发育凹坑(红色箭头)；f—白云石的部分边缘呈弧形曲线(绿色实线)；g—草莓状黄铁矿中晶粒融合在一起；h—草莓状黄铁矿晶间孔挤入其他细粒物质(红色箭头)；i—富孔隙的有机黏粒复合体；j—富孔隙的纯净有机质；k—无孔隙的纯净有机质；l—富孔隙和无孔隙纯净有机质自然过渡(红色箭头)

图 7 黄 205 井观音桥层细粒物质的典型纳米岩石图像

Fig. 7 Typical nanoscale petrological images of fine grains in the Guanyiqiao Bed of Well H 205

石图像观测四川盆地及邻区观音桥层岩石学特征如下：

1）观音桥层和下伏块状黑色页岩突变接触(图 2-a)，观音桥层粗粒碎屑丰富(图 2-a，2-b，

2-c），而下伏黑色块状页岩缺乏粗粒碎屑（图 2-a）；

2）横断面可见保存较完整的介壳顺层分布（图 2-e，2-f，2-g），纵切面介屑破碎度高且分布杂乱（图 2-h，2-i）；

3）粗粒碎屑主要包括陆源石英和浅水介屑（图 2-h，2-i），介屑为长条形、短棒状和不规则的方解石（图 2-j），石英颗粒大小混杂、分选差、磨圆度好坏不一（图 2-k）；

4）粗粒碎屑“悬浮”在细粒物质中，下部粗粒碎屑含量高且以陆源石英为主，向上石英颗粒锐减而介屑含量增加，在总体杂乱堆积的背景下时而出现粗粒碎屑疏密相间的微区自然过渡和突变接触（图 2-h，2-i）；

5）长条状介屑近水平排列和杂乱堆积的现象普遍（图 2-b，2-h，2-i）；

6）细粒物质主要为混杂堆积的石英、方解石、白云石、有机质、黏土、黄铁矿等（图 3；图 4；图 5；图 6）；

7）细粒石英划分为泥级石英和粉砂级石英，泥级石英颗粒内部通常有孔隙且数量不一的颗粒形成聚合体（图 7-a），粉砂级石英颗粒缺乏孔隙（图 7-b）。泥级石英颗粒是生物质硅溶解—沉淀的产物（秦亚超，2010；杨殿范等，2010；卢龙飞等，2020；Zhou *et al.*，2024），而缺乏孔隙的粉砂级石英为陆源碎屑（Zhou *et al.*，2024）。生物质硅是四川盆地及邻区五峰组—龙马溪组深水黑色硅质页岩中石英的主要来源（王淑芳等，2014；蔡全升等，2020；陈增裕等，2023）；

8）方解石颗粒不规则，其溶蚀孔隙充填具有粒内孔隙的泥级石英颗粒（图 7-c）；

9）白云石呈菱形形貌（图 7-d），粒内溶蚀孔隙较为丰富（图 7-d，7-e，7-f），边缘的破损表现为凹坑（图 7-e）或弧形曲线（图 7-f）。菱形白云石为水—沉积物界面之下形成的胶结物（周晓峰等，2022b），边缘凹坑指示其经历过碰撞，而弧形边缘表明其可能经历过化学风化；

10）草莓状黄铁矿中晶粒融合在一起（图 7-g），或因其他物质挤入而晶粒间漂浮、点状、线状接触同时出现（图 7-h）；

11）有机质可以划分为有机黏粒复合体和纯净有机质，有机黏粒复合体发育有机孔（图 7-i），纯净有机质进一步细分为富孔隙的纯净有机质（图 7-j）和无孔隙的纯净有机质（图 7-k），通常可见富孔隙和无孔隙纯净有机质自然过渡（图 7-l）。前期工作表明，富孔隙的有机黏粒复合体为焦沥青黏粒复合体，富孔隙的纯净有机质为焦沥青化迁移油前沥青，无孔隙的纯净有机质为焦沥青化石油，它们都是沉有机黏粒复合体热演化的产物，其中焦沥青黏粒复合体系沉有机黏粒复合体原位热降解的产物（周晓峰等，2022a）。

3.2　观音桥层岩石学表征

融合岩石学特征，结合前期对四川盆地五峰组—龙马溪组有机质热演化生烃成孔过程（周晓峰等，2022a）、方解石和白云石成因分析（周晓峰等，2022b）以及陆源石英和生物质硅识别（Zhou *et al.*，2024）等研究成果，将观音桥层表征为由 4 个子系统组成的结构复杂但总体表现为细粒物质中悬浮粗粒碎屑的岩层。4 个子系统为滨岸碎屑子系统、浅水生屑子系统、深水生屑子系统和有机质子系统。滨岸碎屑子系统主要为粒径不一的石英和黏土，浅水生屑子系统主要为形貌各异的方解石，深水生屑子系统主要为具有孔隙的泥级生物质硅和少量方解石及白云石，有机质子系统由富孔隙的有机黏粒复合体、富孔隙的纯净有机质和无孔隙的纯净有机质组成。细粒物质为滨岸石英和黏土、浅水生屑、深水生屑、有机质等混杂堆积，粗粒的滨岸石英和浅水生屑悬浮在细粒物质中。

根据粗粒碎屑和细粒物质含量高低的差异，不同微区表现为杂基支撑结构（图 2-k；图 3）、互嵌结构（图 4）和漂浮结构（图 2-j，2-l，2-m；图 5；图 6）。这几种结构的微区杂乱无章堆积形成观音桥层。

有机质浸染细粒石英、方解石、白云石、黏土等矿物颗粒，导致露头、岩心、岩石薄片不能有效分辨矿物组分，以往的研究成果把这些细粒物质主要视为泥晶方解石、白云石和/或黏土（戎嘉余，1979；陈旭等，2000；徐论勋等，2004；高振中等，2008；戎嘉余等，2011；张琳娜等，2016；梁萍萍等，2022；时志强等，2024）。以全岩分析数据划分岩相，则把粗粒滨岸石英碎屑为主的样品和泥级深水生物质硅为主的样品都视作硅质页岩，把滨岸石英和浅水介屑为主的岩样与深水生物质硅和

浅水介屑为主的岩样都视作钙质硅质页岩（王玉满等，2016；沈均均等，2023）。因此，露头、岩心、光学显微镜、电子探针显微镜和 4 nm MAPS 岩石图像数据体的无缝衔接是观察岩石学特征和开展岩石学表征的有效路径，其中，露头、岩心、岩石薄片观察粗粒碎屑的组分和赋存状态，4 nm MAPS 岩石图像数据体观察细粒物质的组分和赋存状态，电子探针显微镜观测衔接露头、岩心、岩石薄片和 4 nm MAPS 岩石图像数据体的观察结果。

3.3 观音桥层形成过程

通过剖析岩石学特征，结合早期研究成果（周晓峰等，2022a，2022b；Zhou *et al.*，2024）以及观音桥层厚度薄、分布广、对下伏地层改造弱的特点（戎嘉余等，2011；王玉满等，2016；张琳娜等，2016；赵明胜和王约，2018；沈均均等；2023；时志强等，2024），作者对四川盆地及邻区观音桥层的形成过程给予了合理的解释（图 8）。该过程分为沉积作用子过程和埋藏成岩作用子过程，其中沉积作用子过程进一步划分为 3 个阶段：滨岸重力流形成阶段、浅水重力流形成阶段、深水砂泥质碎屑流形成阶段，埋藏成岩作用子过程进一步划分为 4 个阶段：浅埋藏成岩阶段、中等埋藏早期成岩阶段、中等埋藏晚期成岩阶段、深埋藏成岩阶段。滨岸重力流和/或浅水重力流可能包括碎屑流、颗粒流、浊流等多种流态甚至滑动、滑塌，至深水转化为砂泥质碎屑流（Shanmugam，1996），但不排除发育其他流态的深水重力流或深水牵引流（徐论勋等，2004；高振中等，2008），形成钙质硅质页岩或硅质页岩（王玉满等，2016；沈均均等，2023）。下面对图 8 做简要解释。

第Ⅰ阶段为滨岸重力流形成阶段。奥陶纪—志留纪之交是地质历史关键转折期，该时期发生了一系列的地质事件，包括火山活动（Buggisch *et al.*，2010；谢浩然等，2023）、冰期（Pope and Steffen，2003）以及生物大灭绝（Bond and Grasby，2017），导致海洋环境重力流频发。在滨岸环境，分选好、磨圆度高的陆源石英碎屑为主的砂质沉积物和少量粉砂级石英、泥级石英及黏土为主的泥质沉积物被再造为颗粒大小混杂的重力流。

第Ⅱ阶段为浅水重力流形成阶段。滨岸环境形成的重力流流经浅海时，侵蚀赫南特贝动物群死亡后形成的介壳堆积体，并把介壳卷入重力流，滨岸石英为主的重力流转化为滨岸石英和浅水生屑为主的重力流，细粒碎屑为粉砂级、泥级石英和介屑（方解石）以及黏土。重力流也可以起始于浅海，形成浅水生屑为主的重力流。

第Ⅲ阶段为深水砂泥质碎屑流形成阶段。四川盆地及邻区晚奥陶世五峰期深水沉积物通常为硅质软泥，其主要由泥级生物质硅、有机黏粒复合体、不规则方解石和少量菱形白云石、草莓状黄铁矿等组成（杜伟等，2020；周晓峰等，2022a，2022b；汪勇等，2024），其中不规则方解石为海洋表层水体分泌钙碳酸盐微生物的新陈代谢产物，菱形白云石是水—沉积物界面之下形成的胶结物，草莓状黄铁矿以晶粒线状、点状和“漂浮”状接触的形式产出。以滨岸石英和/或浅水生屑为主的重力流侵蚀深水硅质软泥，形成深水砂泥质碎屑流。这种碎屑流兼有砂质碎屑流和泥质碎屑流的流态特征，表现为由 4 个子系统组成形式多样的细粒物质悬浮粗粒碎屑的复杂结构，长条状生屑顺层排列是砂质碎屑流的典型特征，而杂乱排列是泥质碎屑流的典型特征（Shanmugam，1996；操应长等，2017；金杰华等，2019；陈宇航等，2021；李奋其等，2024）。奥陶纪—志留纪之交，四川盆地及邻区海底深度可能位于碳酸盐补偿深度之下（周晓峰等，2022b），被重力流再搬运的方解石和白云石发生溶解，白云石的菱形边溶蚀为弧形边。砂泥质碎屑流迁移过程中，泥级生物质硅充填方解石溶蚀孔隙（图 7-c），颗粒相互碰撞导致菱形白云石边缘出现破损（图 7-e），抗碰撞和剪切能力强的晶粒线状接触的草莓状黄铁矿保留下来（图 7-g），晶粒点状接触的草莓状黄铁矿被其他细粒物质挤入而变形（图 7-h），晶粒“漂浮”的草莓状黄铁矿解体。

在浅埋藏成岩阶段（第Ⅳ阶段），生物质硅发生溶解—沉淀反应，沉积有机黏粒复合体转化为干酪根黏粒复合体。进入中等埋藏早期成岩阶段（第Ⅴ阶段），生物质硅继续溶解—沉淀反应，干酪根黏粒复合体转化为油前沥青黏粒复合体和迁移油前沥青。在中等埋藏晚期成岩阶段（第Ⅵ阶段），生物质硅转化为多孔石英，油前沥青黏粒复合体转化为固体沥青黏粒复合体和石油，迁移油前沥青转化为固体沥青和石油。至深埋藏成岩阶段（第Ⅶ阶段），固体沥青黏粒复合体转化为富孔隙的焦沥青黏粒复合体（富孔隙的有机黏粒复合

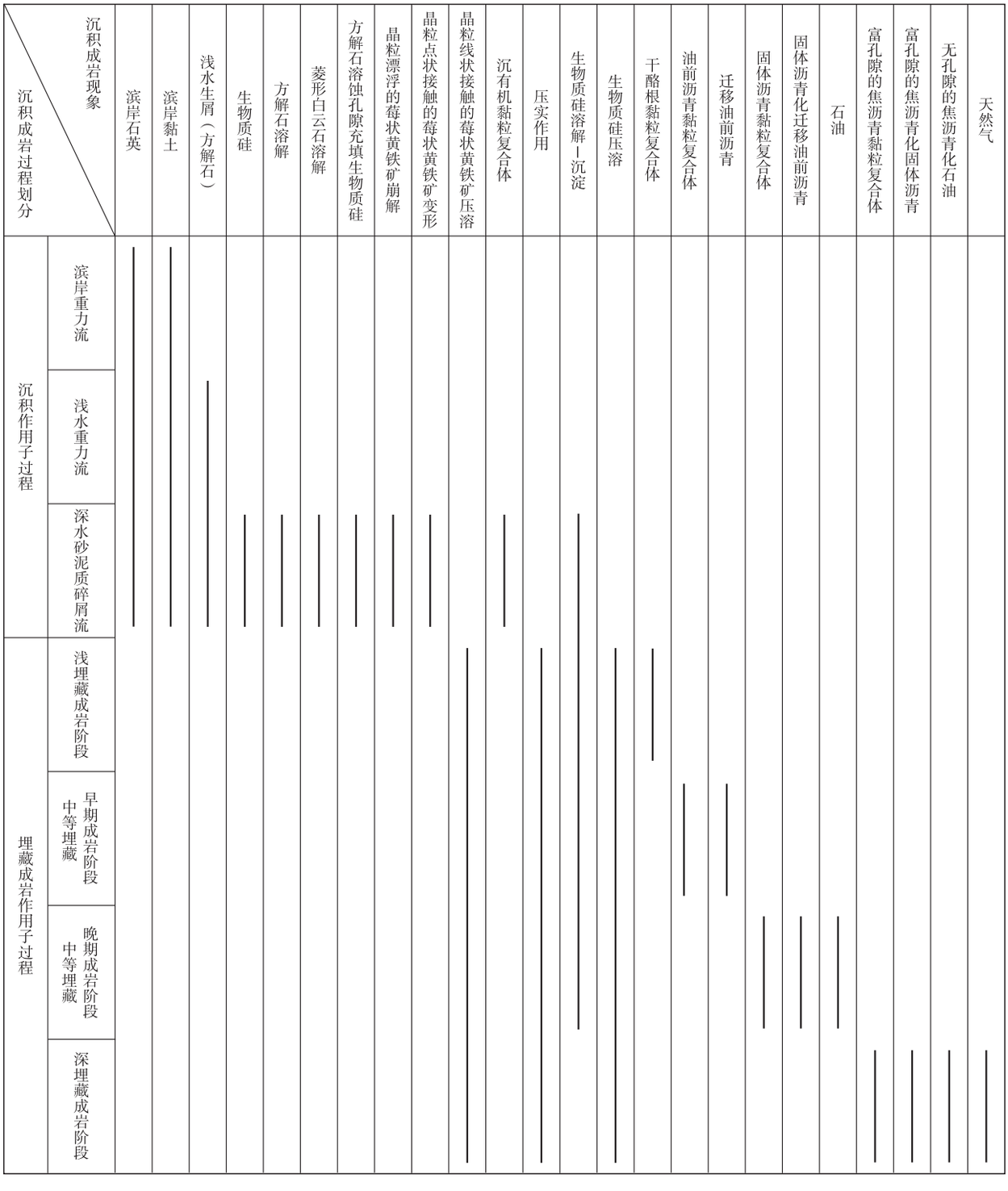


图 8　四川盆地及邻区观音桥层沉积成岩作用过程

Fig. 8　Sedimentary and diagenetic process of the Guanyinqiao Bed in Sichuan Basin and its adjacent area

体），固体沥青转化为富孔隙的焦沥青（富孔隙的纯净有机质），石油转化为无孔隙的焦沥青（无孔隙的纯净有机质）。

成分和结构成熟度低、压实作用强度高的观音桥层与压实作用强度低的硅质页岩比较，有机黏粒复合体因承担上覆地层压力而纳米孔隙发育较差，

生物质硅聚合体和草莓状黄铁矿因强烈的压溶作用而更加致密（周晓峰等，2022a；汪勇等，2024；Zhou *et al.*，2024）。因此，观音桥层砂泥质碎屑流沉积是较差的页岩储集层。

4 讨论

奥陶纪—志留纪之交的赫南特期是奥陶纪末不足 200 万年的时间段，虽时限短，却发生了显生宙第 1 次、规模第二大的海洋生物集群灭绝事件。这段时间沉积的地层在全球广泛分布，为研究生物与海洋环境的相互作用以及协同演化提供了绝佳窗口，已在古生物学、古生态学、地球化学、古地理学等方面积累了丰富的资料（戎嘉余，1979；陈旭等，2000；Sheehan 2001；Pope and Steffen，2003；Finney，2005；Buggisch *et al.*，2010；Bond and Grasby，2017）。中国南方赫南特阶分布规模大、保存完整，是全球开展奥陶纪—志留纪之交生物与海洋环境相互作用以及协同演化研究的首选地（戎嘉余，1979；陈旭等，2000）。四川盆地及邻区赫南特阶包括上奥陶统五峰组和下志留统龙马溪组底部数米，五峰组顶部厚度普遍不足 1 m、横向分布稳定、含丰富介屑而易于识别的观音桥层通常作为区域上划分奥陶系和志留系的标志层以及研究古生物学、古生态学、古地理学以及生物集群灭绝事件的突破口（戎嘉余，1979；陈旭等，2000；戎嘉余等，2011；张琳娜等，2016）。

长期以来，以野外露头和手标本观察为主要手段，辅以光学显微镜，将富含浅水介壳的细粒碎屑岩鉴定为石灰岩、泥灰岩、灰质泥岩、白云岩，故此认为中国南方观音桥层系浅水沉积，由冈瓦纳冰川所造成的全球海平面急剧下降所致，进而引发生物集群灭绝（戎嘉余，1979；陈旭等，2000；戎嘉余等，2011；谢尚克等，2011；张琳娜等，2016）。王玉满等（2016）和沈均均等（2023）依据全岩分析数据，将四川盆地的南部主体划归钙质硅质页岩相，中部和北部划归硅质页岩相，认为硅质系深水生物成因，观音桥层与上、下岩层均为连续的深水沉积。2 种方法给出的四川盆地及邻区观音桥层岩相不一致表明，露头、手标本和光学显微镜把细粒硅质矿物错误地鉴定为细粒方解石，而全岩分析可能把粗粒陆源石英碎屑解释为深水生物硅质、浅水介壳解释为深水方解石碎屑。鉴于此，露头、岩心、光学显微镜、电子探针显微镜和 4 nm MAPS 岩石图像数据体的无缝衔接，是表征观音桥层岩石学特征的有效路径，解析矿物成分复杂、颗粒粒径相差悬殊、泥级物质丰富的观音桥层，为由滨岸碎屑、浅水生屑、深水生屑、有机质等 4 个子系统形成的具有复杂结构的深水砂泥质碎屑流沉积。

徐论勋等（2004）综合分析沉积速率、古生态学、生物古地理学、海平面变化、沉积特征等指出，观音桥层为深水牵引流沉积。高振中等（2008）依据层薄但分布规模大及与上、下黑色块状页岩沉积不协调认为，四川盆地及邻区奥陶纪—志留纪之交发育深水异地沉积，包括深水重力流沉积和深水牵引流沉积。陆源石英和浅水介屑混入观音桥层指示深水异地沉积，但究竟是深水重力流沉积还是深水牵引流沉积，需要电子探针显微镜和 MAPS 岩石图像数据体提供的证据验证，黏土和有机黏粒复合体丰富则可能是深水重力流或静水物理化学沉积（蔡进功等，2019），缺乏黏土和有机黏粒复合体更可能是深水牵引流沉积（Zhou *et al.*，2024），这是因为深水牵引流具有一定的流速而使悬浮的黏土微粒和有机黏粒复合体难以沉降下来造成的。由图 3、图 4、图 5、图 6 和图 7 可知，黄 204 井、黄 205 井、威 231 井、自 305 井、宁 209 井的观音桥层黏土和有机黏粒复合体丰富，预示着四川盆地及邻区奥陶纪—志留纪之交发育深水重力流，且可能主要为砂泥质碎屑流。

生物地层研究结果发现，奥陶系—志留系界线地层在华南地区甚至全球都并非严格等时，更有甚者出现地层倒转、缺失、不整合等现象（戎嘉余，1979；陈旭等，2000；戎嘉余等，2011），说明观音桥层的重力流沉积具有全球性和多期性，多期重力流作用可能是地层倒转的主要原因，重力流对海底沉积物的搅动和侵蚀可能是局部区域地层缺失的重要因素，而多阶段差异隆升和沉降可能是引起局部区域地层不整合现象的控制因素。

页岩气勘探开发实践证实，四川盆地及邻区观音桥层上、下的黑色块状页岩是优质储集层，有机质含量高。目前石油天然气工业界普遍接受观音桥层系浅水沉积的观点，由此认为快速海进引起的陆源碎屑供给减少、沉积速率降低和表层水体初级生产力高、深层水体缺氧共同作用决定了黑色页岩中有机质富集（施振生等，2023）。观音桥层为深水

砂泥质碎屑流沉积表明，四川盆地及邻区奥陶纪—志留纪之交海洋沉积环境发生了 1 次重大幕式变化，表现为静水物理化学沉积环境与深水重力流沉积环境的快速转换，观音桥层沉积时期对应这幕事件的高潮，序幕和尾声发育上升流，引发异常高初级生产力，导致黑色块状页岩有机质富集。多阶段差异隆升和沉降（陈旭等，2000；戎嘉余等，2011）以及火山活动频发（Buggisch *et al.*，2010；谢浩然等，2023）是这幕事件的直接证据。观音桥层硅质页岩有机碳含量普遍超过 4%（王玉满等，2016；沈均均等，2023），不排除其沉积时期上升流发育的可能性，只是由于多期次深水重力流改造导致沉积信息面目全非。生物集群灭绝事件可能是火山作用和深水缺氧沉积环境共同作用的结果（Buggisch *et al.*，2010；王勇，2023；谢浩然等，2023），而这样的海洋环境通常微生物繁盛进而引发有机质富集（潘松圻等，2021）。

本次数据点偏少、分布范围不大，尚不能确定四川盆地及邻区甚至华南地区观音桥层是否还有其他沉积类型和黏土是源自滨岸、浅海、深水沉积物还是风力搬运；以图 1作为约束条件，在不同岩相区大致等间距选取岩样，通过露头、岩心、普通薄片、电子探针显微镜以及关键点的 MAPS 图像数据体开展岩石学表征，是恢复四川盆地及邻区奥陶纪—志留纪之交古地理面貌的有效路径；大气淡水淋滤和生物改造不可避免地导致露头观音桥层碳酸盐矿物、黏土和有机质信息的丢失或失真，相关研究尽可能多的选用新鲜岩心。

作者以期抛砖引玉，推动综合应用露头、岩心、光学显微镜、电子探针显微镜、MAPS 技术等有序衔接开展华南甚至全球奥陶纪—志留纪之交的沉积环境和沉积相研究，进而对古生物学、古生态学、古地理学、生物集群灭绝事件和有机质富集规律做出更加合理的解释。

5　结论

1）四川盆地及邻区五峰组观音桥层是由滨岸碎屑、浅水生屑、深水生屑、有机质等 4 个子系统组成的具有复杂结构的深水砂泥质碎屑流沉积。

2）观音桥层形成过程划分为沉积作用子过程和埋藏成岩作用子过程。沉积作用子过程进一步划分为滨岸重力流、浅水重力流、深水砂泥质碎屑流等 3 个阶段，形成细粒物质悬浮粗粒碎屑的沉积物。埋藏成岩作用子过程进一步划分为浅埋藏成岩阶段、中等埋藏早期成岩阶段、中等埋藏晚期成岩阶段和深埋藏成岩阶段等 4 个阶段，总体表现为强烈的压实和溶蚀作用以及沉积有机质转化为富孔隙和无孔隙的焦沥青。

3）建议综合应用露头、岩心、光学显微镜、电子探针显微镜、MAPS 技术等有序衔接开展华南观音桥层甚至全球奥陶系—志留系界线地层的形成过程分析。

致谢　感谢评审专家中肯意见和建议。特此致谢！

参考文献（References）

蔡进功，曾翔，韦海伦，宋明水，王学军，刘庆. 2019. 从水体到沉积物：探寻有机质的沉积过程及其意义. 古地理学报，21(1)：49－67. [Cai J G，Zeng X，Wei H L，Song M S，Wang X J，Liu Q. 2019. From water body to sediments：exploring the depositional processes of organic matter and their implications. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition)，21(1)：49－67]

蔡全升，陈孝红，张保民，刘安，韩京，张国涛，李炎桂. 2020. 鄂西宜昌地区五峰—龙马溪组黑色岩系硅质来源及其油气地质意义. 地质学报，94(3)：931－946. [Cai Q S，Chen X H，Zhang B M，Liu A，Han J，Zhang G T，Li Y G. 2020. Origin of siliceous minerals in the black shale of the Wufeng and Longmaxi Formations in the Yichang area，western Hubei Province：geological significance for shale gas. Acta Geologica Sinica，94(3)：931－946]

操应长，杨田，王艳忠，张少敏，王思佳，张青青，王心怿. 2017. 深水碎屑流与浊流混合事件层类型及成因机制. 地学前缘，24(3)：234－248. [Cao Y C，Yang T，Wang Y Z，Zhang S M，Wang S J，Zhang Q Q，Wang X Y. 2017. Types and genesis of deep-water hybrid event beds comprising debris flow and turbidity current. Earth Science Frontiers，24(3)：234－248]

陈旭，戎嘉余，樊隽轩，詹仁斌，张元动，李荣玉，王怿，Mitchell C E，Harper D A T. 2000. 奥陶—志留系界线地层生物带的全球对比. 古生物学报，39(1)：100－114. [Chen X，Rong J Y，Fan J X，Zhan R B，Zhang Y D，Li R Y，Wang Y，Mitchell C E，Harper D A T. 2000. A global correlation of biozones across the Ordovician-Silurian boundary. Acta Palaeontologica Sinica，39(1)：100－114]

陈宇航，姚根顺，邵大力，鲁银涛，吕福亮，曹全斌，唐鹏程，李仕芳. 2021. 坦桑尼亚滨海盆地陆坡峡谷沉积特征及其控制因素. 古地理学报，23(6)：1158－1173. [Chen Y H，Yao G S，Shao D L，Lu Y T，Lü F L，Cao Q B，Tang P C，Li S F. 2021. Sedimentary characteristics and its controlling factors of continental slope canyons in Tanzania Coastal Basin. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition)，23(6)：1158－1173]

陈增裕,刘睿,谭秀成,井翠,聂舟,衡德,江定川,文冉,陈雷,唐余锋,唐奎. 2023. 四川盆地南缘长宁地区五峰组—龙马溪组页岩内多源石英对页岩气富集的意义. 古地理学报,25(4):920-930. [Chen Z Y,Liu R,Tan X C,Jing C,Nie Z,Heng D,Jiang D C,Wen R,Chen L,Tang Y F,Tang K. 2023. Implications of multi-source quartz on shale-gas enrichment in the Wufeng-Longmaxi shale of Changning area in southern margin of Sichuan Basin,China. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition),25(4):920-930]

杜伟,胡宗全,刘光祥,朱彤,聂海宽,颜彩娜,王冠平. 2020. 四川盆地及周缘上奥陶统五峰组岩相特征. 石油实验地质,42(3):398-404. [Du W,Hu Z Q,Liu G X,Zhu T,Nie H K,Yan C N,Wang G P. 2020. Lithofacies of Upper Ordovician Wufeng Formation in Sichuan Basin and its periphery. Petroleum Geology and Experiment,42(3):398-404]

高振中,何幼斌,李罗照,卿崇文,肖明国,程四洪,张文成,刘伟伟. 2008. 中国南方上奥陶统五峰组观音桥段成因讨论:是"浅水介壳相"还是深水异地沉积? 古地理学报,10(5):487-494. [Gao Z Z,He Y B,Li L Z,Qing C W,Xiao M G,Cheng S H,Zhang W C,Liu W W. 2008. Genesis of the Guanyinqiao Member of Upper Ordovician Wufeng Formation in southern China:"Shallow water shelly facies"or deep-water allogenic deposition? Journal of Palaeogeography(Chinese Edition),10(5):487-494]

金杰华,操应长,王健,杨田,周磊. 2019. 深水砂质碎屑流沉积:概念、沉积过程与沉积特征. 地质论评,65(3):689-702. [Jin J H,Cao Y C,Wang J,Yang T,Zhou L. 2019. Deep-water sandy debris flow deposits:concepts,sedimentary processes and characteristics. Geological Review,65(3):689-702]

李奋其,郑荣才,张士贞,李俊,刘函,秦雅东. 2024. 西藏那曲地区中晚侏罗世拉贡塘组深水碎屑流沉积特征和沉积模式. 中国地质,51(6):2028-2041. [Li F Q,Zheng R C,Zhang S Z,Li J,Liu H,Qin Y D. 2024. Depositional characteristics and model of the deep-water debris flow of the Mid-Late Jurassic Lagongtang Formation in the Nagqu area,Tibet. Geology in China,51(6):2028-2041]

梁萍萍,郭伟,王南,赵文韬,王红岩,马譞,李越. 2022. 川南威远—泸州页岩气井区奥陶系顶部观音桥组岩相和沉积环境. 地质科学,57(1):115-126. [Liang P P,Guo W,Wang N,Zhao W T,Wang H Y,Ma X,Li Y. 2022. Lithofacies and sedimentary environments of the uppermost Ordovician Kuanyinchiao Formation from the wells in Weiyuan-Luzhou,southern Sichuan. Chinese Journal of Geology,57(1):115-126]

卢龙飞,刘伟新,俞凌杰,张文涛,申宝剑,腾格尔. 2020. 生物蛋白石早期成岩相变特征及对硅质页岩孔隙发育与孔径分布的影响. 石油实验地质,42(3):363-370. [Lu L F,Liu W X,Yu L J,Zhang W T,Shen B J,Tenger. 2020. Early diagenesis characteristics of biogenic opal and its influence on porosity and pore network evolution of siliceous shale. Petroleum Geology and Experiment,42(3):363-370]

潘松圻,邹才能,李勇,荆振华,刘恩涛,袁铭,张国生,杨智,吴松涛,邱振,刘翰林. 2021. 重大生物事件与化石能源形成演化:兼论地球系统框架下能源学发展. 石油勘探与开发,48(3):498-509. [Pan S Q,Zou C N,Li Y,Jin Z H,Liu E T,Yuan M,Zhang G S,Yang Z,Wu S T,Qiu Z,Liu H L. 2021. Major biological events and fossil energy formation:on the development of energy science under the earth system framework. Petroleum Exploration and Development,48(3):498-509]

秦亚超. 2010. 生物硅早期成岩作用研究进展. 地质论评,56(1):89-98. [Qin Y C. 2010. Research progress in early diagenesis of biogenic silica. Geological Review,56(1):89-98]

戎嘉余. 1979. 中国的赫南特贝动物群(Hirnantia fauna)并论奥陶系与志留系的分界. 地层学杂志,3(1):1-28. [Rong J Y. 1979. Hirnantia fauna in China and discussing the boundary between Ordovician and Silurian periods. Acta Stratigraphica Sinica,3(1):1-28]

戎嘉余,陈旭,王怿,詹仁斌,刘建波,黄冰,唐鹏,吴荣昌,王光旭. 2011. 奥陶—志留纪之交黔中古陆的变迁:证据与启示. 中国科学:地球科学,41(10):1407-1415. [Rong J Y,Chen X,Wang Y,Zhan R B,Liu J B,Huang B,Tang P,Wu R C,Wang G X. 2011. Northward expansion of Central Guizhou Oldland through the Ordovician and Silurian transition:evidence and implications. Sci Sin Terrae,41(10):1407-1415]

沈均均,杨丽亚,王玉满,计玉冰,李辉,王鹏万,蔡全升,孟江辉. 2023. 鄂西地区上奥陶统五峰组观音桥段成因及其页岩气地质意义. 中国石油大学学报(自然科学版),47(2):13-23. [Shen J J,Yang L Y,Wang Y M,Ji Y B,Li H,Wang P W,Cai Q S,Meng J H. 2023. Genesis of Guanyinqiao bed of the Upper Ordovician Wufeng Formation and its geological significance of shale gas in western Hubei. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),47(2):13-23]

施振生,王红岩,赵圣贤,周天琪,赵群,祁灵. 2023. 川南地区五峰组—龙马溪组快速海进页岩特征及有机质分布. 古地理学报,25(4):788-805. [Shi Z S,Wang H Y,Zhao S X,Zhou T Q,Zhao Q,Qi L. 2023. Rapid transgressive shale characteristics and organic matter distribution of the Upper Ordovician-Lower Silurian Wufeng-Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin,China. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition),25(4):788-805]

时志强,彭深远,赵子腾. 2024. 上奥陶统五峰组海底麻坑沉积的首次识别及其地质意义. 古地理学报,26(2):255-268. [Shi Z Q,Peng S Y,Zhao Z T. 2024. First identification and its geological significance of seafloor pockmarks sediments in the Upper Ordovician Wufeng Formation in China. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition),26(2):255-268]

汪勇,郭伟,高金亮,高欢,肖红纱,周天琪,蔡景顺,詹鸿铭. 2024. 四川盆地奥陶系五峰组—志留系龙马溪组黄铁矿-有机聚合体特征. 地球化学,53(5):695-707. [Wang Y,Guo W,Gao J L,Gao H,Xiao H S,Zhou T Q,Cai J S,Zhan H M. 2024. Characteristics of pyrite and organic matter aggregates in the Ordovician Wufeng-Silurian Longmaxi Formation,Sichuan Basin. Geochimica,53(5):695-707]

王淑芳,邹才能,董大忠,王玉满,黄金亮,郭召杰. 2014. 四川盆地富

有机质页岩硅质生物成因及对页岩气开发的意义. 北京大学学报(自然科学版),50(3): 476-486. [Wang S F, Zou C N, Dong D Z, Wang Y M, Huang J L, Guo Z J. 2014. Biogenic silica of organic-rich shale in Sichuan basin and its significance for shale gas. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 50(3): 476-486]

王勇. 2023. 华南奥陶纪—志留纪之交火山活动对海洋环境与有机质富集的影响. 中南大学博士学位论文. [Wang Y. 2023. The influence of volcanic activities on the marine environment and organic matter accumulation during the Ordovician-Silurian transition in South China. Doctoral dissertation of Central South University]

王玉满,董大忠,黄金亮,李新景,王淑芳. 2016. 四川盆地及周边上奥陶统五峰组观音桥段岩相特征及对页岩气选区意义. 石油勘探与开发,43(1): 42-50. [Wang Y M, Dong D Z, Huang J L, Li X J, Wang S F. 2016. Guanyinqiao Member lithofacies of the Upper Ordovician Wufeng Formation around the Sichuan Basin and the significance to shale gas plays, SW China. Petroleum Exploration and Development, 43(1): 42-50]

谢浩然,梁超,吴靖,籍士超. 2023. 火山活动对沉积古环境及有机质富集的影响. 古地理学报,25(4): 768-787. [Xie H R, Liang C, Wu J, Ji S C. 2023. Impacts of volcanic activity on sedimentary palaeo-environment and organic matter enrichment. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition), 25(4): 768-787]

谢尚克,汪正江,王剑. 2011. 黔东北地区晚奥陶世岩相古地理. 古地理学报,13(5): 539-549. [Xie S K, Wang Z J, Wang J. 2011. Lithofacies palaeogeography of the Late Ordovician in northeastern Guizhou Province. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition), 13(5): 539-549]

徐论勋,肖传桃,龚文平,何幼斌. 2004. 论扬子地区上奥陶统五峰组观音桥段的深海成因. 地质学报,78(6): 726-732. [Xu L X, Xiao C T, Gong W P, He Y B. 2004. A study on the deep-sea sediment of the Guanyinqiao Memberof the Upper Ordovician Wufeng Formation in the Yangtze Area. Acta Geologica Sinica, 78(6): 726-732]

杨殿范,魏存弟,宁维坤,徐少南,蒋引珊. 2010. 嫩江蛋白石页岩的结构及其吸附性能. 吉林大学学报(地球科学版),40(5): 1061-1065. [Yang D F, Wei C D, Ning W K, Xu S N, Jiang Y S. 2010. Structure and adsorption properties of Nenjiang opal shale. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 40(5): 1061-1065]

张琳娜,樊隽轩,陈清. 2016. 华南上奥陶统观音桥层的空间分布和古地理重建. 科学通报,61(18): 2053-2063. [Zhang L N, Fan J X, Chen Q. 2016. Geographic distribution and palaeogeographic reconstruction of the Upper Ordovician Kuanyinchiao Bed in South China. Chinese Science Bulletin, 61(18): 2053-2063]

赵明胜,王约. 2018. 上扬子海南缘晚奥陶世赫南特期沉积相特征及海平面变化. 地球学报,39(2): 189-200. [Zhao M S, Wang Y. 2018. Sedimentary facies features and sea-level fluctuation during the Upper Ordovician Hirnantian Period on the southern margin of the Upper Yangtze Sea. Acta Geoscientica Sinica, 39(2): 189-200]

周晓峰,郭伟,李熙喆,张晓伟,梁萍萍,于均民. 2022a. 四川盆地五峰组—龙马溪组有机质类型与有机孔配置的放射虫硅质页岩岩石学证据. 中国石油大学学报(自然科学版),46(5): 12-22. [Zhou X F, Guo W, Li X Z, Zhang X W, Liang P P, Yu J M. 2022a. Mutual relation between organic matter types and pores with petrological evidence of radiolarian siliceous shale in Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 46(5): 12-22]

周晓峰,李熙喆,郭伟,张晓伟,梁萍萍,于均民. 2022b. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩储层中碳酸盐矿物特征、形成机制及对储层物性影响. 天然气地球科学,33(5): 775-788. [Zhou X F, Li X Z, Guo W, Zhang X W, Liang P P, Yu J M. 2022b. Characteristics, formation mechanism and influence on physical properties of carbonate minerals in shale reservoir of Wufeng-Longmaxi formations, Sichuan Basin. Natural Gas Geoscience, 33(5): 775-788]

Bond D, Grasby S E. 2017. On the causes of mass extinctions. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 478: 3-29.

Buggisch W, Joachimski M, Lehnert O, Bergström S M, Repetski J E, Webers G F. 2010. Did intense volcanism trigger the first Late Ordovician icehouse? Geology, 38: 327-330.

Finney S C. 2005. Global series and stages for the Ordovician system: a progress report. Geologica Acta, 3(4): 309-316.

Pope M C, Steffen J B. 2003. Widespread, prolonged Late Middle to Late Ordovician upwelling in North America: a proxy record of glaciation? Geology, 31(1): 63-66.

Shanmugam G. 1996. High-density turbidity currents: are they sandy debris flows? Journal of Sedimentary Research, 66(1): 2-10.

Sheehan P M. 2001. The Late Ordovician mass extinction. Annual Reviews of Earth and Planetary Science, 29: 331-364.

Zhou X F, Guo W, Li X Z, Liang P P, Yu J M, Zhang C L. 2024. Deciphering nano-resolution petrological characteristics of the siliceous shale at the bottom of the Longmaxi Formation in the Zigong area, Sichuan Basin, China: deep-water microbialites. Minerals, 14(10): 1020.

(责任编辑　郑秀娟)