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)06-1434-18　　**DOI**:10.7605/gdlxb.2025.065

上扬子地区五峰组—龙马溪组生物硅质页岩特征及成因机制：以川南昭通地区为例*

梁　兴[1]　赵建章[2]　张涵冰[1]　张介辉[1]　范小东[1]　罗瑀峰[1]
蒋立伟[1]　张　磊[1]　徐应才[2]　徐方镇[2]

1 中国石油天然气股份有限公司浙江油田分公司，浙江杭州 310023
2 北京华泰兰德科技有限公司，北京 100085

摘　要　五峰组—龙马溪组硅质页岩作为四川盆地重要的页岩气富集岩相之一，其沉积特征和成因机理一直备受关注。本研究基于 MaipSCAN 人工智能电镜矿物扫描、大薄片、场发射扫描电镜和氦离子显微技术分析，揭示了昭通地区五峰组—龙马溪组下部硅质页岩的矿物组成及垂向、平面分布特征。研究表明，该区域硅质页岩厚度稳定且广泛分布，主要矿物包括石英、长石、黏土、黄铁矿、方解石和白云石。垂向上，硅质含量逐渐减少、钙质矿物含量增加、黏土矿物先减少后增加。平面上不同井间矿物分布趋势一致，高硅质含量主要分布在龙一 1^1 和龙一 1^2 小层，整体硅质含量超过 50%，为生物硅质页岩集中发育段。硅质页岩呈泥质和粉砂质 2 类纹层，其中粉砂质纹层颗粒较粗，呈现放射虫纹层和钙质微生物纹层交替特征。其中放射虫富集纹层表现为无粒序特征，不同粒度的放射虫壳体随机分布，硅质含量高且纹层连续性分布。钙质微生物富集纹层表现为凝聚团块，颗粒没有规则的外部形态，内部呈絮凝状，颗粒大小不一，纹层呈断续、板状和平行状，厚度变化快。研究指出，生物硅质页岩形成受到快速海进和火山作用的双重影响，通过调节营养物质和海水化学性质变化，影响生态位和生态条件，进而控制不同类型纹层的形成。硅质页岩具有高有机质含量、孔隙连通性好、良好脆性和强压裂性，因而成为页岩气勘探的首选目标。

关键词　生物硅质页岩　矿物组成　放射虫纹层　钙藻纹层　五峰组　龙马溪组　昭通地区　四川盆地

第一作者简介　梁兴，男，1965 年生，教授级高级工程师，长期从事页岩气、页岩油、油气生产和科技管理工作。E-mail：liangx85@petroChina.com.cn。

通讯作者简介　赵建章，男，1961 年生，教授级高级工程师，长期从事沉积学与储层地质学研究和油气勘探评价工作。E-mail：zjz812@vip.sina.com。

中图分类号：P512.2　　**文献标志码**：A

Characteristics and genesis mechanism of biogenic siliceous shale of the Wufeng and Longmaxi formations in Upper Yangtze Region: a case study of Zhaotong area in southern Sichuan Basin

LIANG Xing[1]　ZHAO Jianzhang[2]　ZHANG Hanbing[1]　ZHANG Jiehui[1]　FAN Xiaodong[1]　LUO Yufeng[1]
JIANG Liwei[1]　ZHANG Lei[1]　XU Yingcai[2]　XU Fangzhen[2]

1 *Zhejiang Oil Field Company, PetroChina, Hangzhou* 310023, *China*
2 *Beijing Huatai Lande Technology Co., Ltd., Beijing* 100085, *China*

* 国家重大科技专项（编号：2020YFA0710604）和中国石油集团公司重大专项（编号：2021DJ1903）联合资助。[Co-funded by the National Important Science and Technology Project (No. 2020YFA0710604) and CNPC Science and Technology Major Project (No. 2021DJ1903)]
收稿日期：2024-10-18　　改回日期：2024-12-17

Abstract　The Wufeng and Longmaxi formations are the key shale gas-enriched lithofacies in the Sichuan Basin, drawing significant attention to its sedimentary characteristics and genetic mechanisms. This study, employing MaipSCAN artificial intelligence electron microscopy mineral scanning, thin sections, field emission scanning electron microscopy, and helium ion microscopy techniques, reveals the mineral composition and vertical as well as horizontal distribution characteristics of the siliceous shale in the Zhaotong-Taiyang area of the Wufeng and Longmaxi formations. The research indicates that the siliceous shale in this region exhibits stable and widespread thickness, with major minerals including quartz, feldspar, clay, pyrite, calcite, and dolomite. Vertically, the silicon content decreases gradually, while the calcium minerals increase and clay minerals first decrease and then increase. Horizontally, the mineral distribution trends between different wells are consistent, with high silicon content mainly concentrated in the Long $1-1^1$and Long $1-1^2$ sub-layers, where the overall silica content exceeds 50%, representing a concentrated development zone of biogenic siliceous shale. The shale displays two types of laminations, mud laminae and silt laminae. The silt laminae exhibit coarser grains, characterized by an alternation of radiolarian laminae and calcareous. The radiolarian and enriched layers exhibit a lack of grain size sorting, random distribution of radiolarian tests of different sizes, high silicon content, and continuous distribution. In contrast, the calcareous algae-enriched layers appear as cohesive clusters with irregular external morphology, internally showing flocculent characteristics with varying particle sizes, discontinuous, platy, parallel, and rapidly changing thickness features. The study highlights that the formation of siliceous shale is influenced by rapid transgression and volcanic activities, regulating nutrient and seawater chemical property changes, impacting ecological niches and conditions, leading to the formation of different types of laminations. Siliceous shale, characterized by high silicon content, high organic matter content, excellent pore connectivity, good brittleness, and strong fracturability, emerges as a primary target for shale gas exploration.

Key words　biogenic siliceous shale, mineral composition, radiolarian-rich layers, calcimicrobe-rich layers, Wufeng Formation, Longmaxi Formation, Zhaotong area, Sichuan Basin

About the first author　LIANG Xing, born in 1965, is a professor-level senior engineer. He is primarily engaged in shale gas, shale oil, oil and gas production, and scientific and technological management work. E-mail: liangx85@petroChina.com.cn.

About the corresponding author　ZHAO Jianzhang, born in 1961, is a professor-level senior engineer. He is engaged in sedimentology and reservoir geology research as well as oil and gas exploration and evaluation. E-mail: zjz812@vip.sina.com.

晚奥陶世—早志留世期间发生一系列重大地质事件，沉积了 1 套黑色页岩（Brenchley *et al.*, 1994；Rong *et al.*, 2020）。这套黑色页岩是石油和天然气的主要来源之一（邹才能等，2017），也是页岩气和页岩油的重要储集库。此外，这套黑色页岩不仅记录了全球碳循环的历史和机制，同时也记录了生物地球化学的演化过程。对这套黑色页岩的研究是理解地球演化历史和地球资源形成的重要窗口之一，对于能源资源勘探以及全球环境变化均具有重要意义。

近年来，页岩油气地质理论不断进步与发展，晚奥陶世—早志留世富有机质黑色页岩作为非常规油气储集层的巨大潜力逐渐被人们所认知（赵建华等，2016；董大忠等，2018；施振生等，2022）。这些页岩多形成于广阔的陆表海环境，具有分布广、发育稳定和时间跨度长等特征（陈科洛等，2018）。在美国东部 Appalachian 盆地、墨西哥湾地区 Fort Worth 盆地，富含硅质的黑色页岩得到了证实（李新景等，2009），其硅质矿物属于生物成因，形成黏土级至粉砂级的结晶石英。这些沉积物

主要来源于浅水陆棚半远洋软泥和生物骨架残骸，沉积过程主要通过密度流悬浮机制完成，属于静水深斜坡至盆地相。

上扬子地区四川盆地奥陶系—志留系五峰组—龙马溪组页岩气由于勘探突破而受到广泛关注（郭彤楼，2016；邹才能等，2017）。国内学者针对这一层系展开了大量矿物组成、纹层特征、微观孔隙类型、孔隙空间连通性以及页岩气含量等方面的研究工作，取得了丰硕成果（梁兴等，2011；赵建华等，2016；董大忠等，2018；施振生等，2018；Qiu and Zou，2020；Shi *et al.*，2021，2022a，2022b）。先前的研究表明，五峰组—龙马溪组下段的黑色页岩形成于快速海进期，与区域的生物及火山活动密切相关（施振生等，2023）。目前，关于该套页岩是典型的生物硅质页岩成因已经达成共识，认为其形成受放射虫、海绵骨针、笔石等生物勃发的影响，具有高硅质含量、高有机碳含量和高脆性等特征（董大忠等，2018；施振生等，2022）。

通过对四川盆地昭通地区太阳气田典型井的硅质页岩特征和结构观察，笔者发现富有机质页岩层段发育的纹层除了由放射虫构成外，还可能存在钙质微生物的影响，形成钙质微生物凝聚态富集的方解石和白云石成岩矿物，方解石和白云石矿物等量富集。钙质微生物形成的纹层厚度相对较小、连续性差、单个纹层厚度横向变化快，在偏光显微镜下呈现为凝聚团块复合体的形态。对于这一现象的探讨，有助于进一步促进五峰组—龙马溪组下部富有机质生物硅质页岩形成环境和成因机理的认识。

1 地质背景

上扬子地区是中国南部一个重要的地质构造单元，其构造演化具有复杂性和多样性（Yao *et al.*，2014）。自元古代至中生代，经历了弧—陆块碰撞、多期造山运动，形成多种岩浆岩、变质岩和沉积岩。中生代在地壳伸展和拆离作用下，形成裂谷盆地和火山岩地质单元。晚中生代至新生代，挤压和剪切等构造变形活动进一步塑造了复杂地质格局（Zhang *et al.*，2010）。新生代以来，强烈的地壳活动不断影响着区域地貌和地质结构，对地质资源分布产生了深远的影响（Zhou *et al.*，2017）。

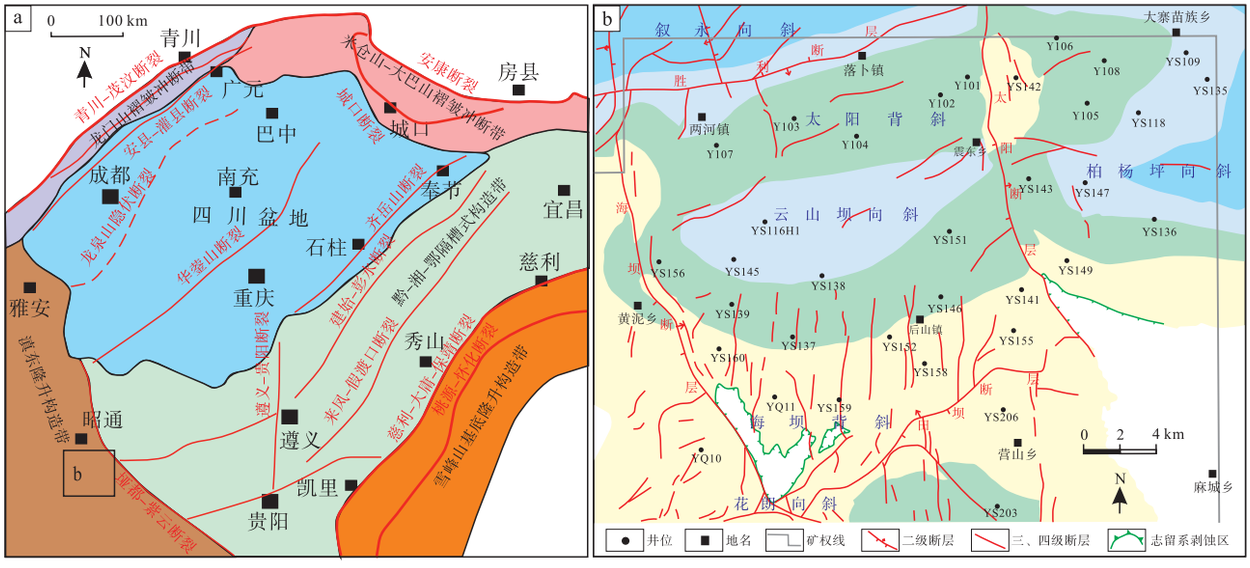
四川盆地位于中上扬子地区，经历多旋回演化和多期构造叠加改造（刘树根等，2011），进而导致四川盆地及周边的海相、海陆过渡相和大部分陆相富有机质的页岩经历了早期深埋藏、后期强烈隆升、剧烈剥蚀和强烈变形作用（Zhou *et al.*，2017）。研究区太阳页岩气田位于四川盆地川南低陡褶皱带与滇黔北坳陷（北部）过渡部，自南向北主要由花朗向斜、海坝背斜、云山坝向斜、太阳背斜、叙永向斜及柏杨坪向斜这 6 个构造单元组成。虽然经历了强烈改造，富含气体的页岩埋藏相对较浅，背斜主体的埋深在 500～1500 m 之间（梁兴等，2021），但大量钻井揭示五峰组—龙马溪组黑色页岩在该区仍然广泛分布（图 1）。

本次研究的目的层从下至上分别为五峰组和龙马溪组下部。五峰组由下部厚度为 1.5～13 m 的黑色薄层状笔石页岩段和顶部厚度为 0.1～0.5 m 的观音桥段深灰色泥质介壳灰岩组成。根据岩性组合、生物纹层组合以及测井曲线特征，龙马溪组纵向上划分为龙马溪组一段和龙马溪组二段。龙马溪组一段主要由泥页岩和泥质页岩组成，具有较高的有机质含量和良好的孔隙结构。该段岩石的颜色一般为深灰色或黑色，质地较细腻，含有丰富的有机碳，含气量较高。龙马溪组二段则由泥页岩、泥质页岩和石英页岩等组成。相较于一段，二段的岩石中石英含量较高。龙马溪组一段可以进一步细分为龙一 1 亚段与龙一 2 亚段，而龙一 1 亚段可进一步细分为龙一 1^1、龙一 1^2、龙一 1^3、龙一 1^4 共 4 个小层。龙马溪组自下而上沉积水体变浅，有机碳含量逐渐降低，含气量逐渐降低，富有机质生物硅质页岩主要发育于龙马溪组下部的龙一 1^1、龙一 1^2 小层，向上粉砂质、灰质增多（梁兴等，2020）（图 2）。

2 样品和方法

2.1 样品采集

本次研究共观察 5 口井（YQ11、YS206、Y104、YS118、YS207）的 318 m 岩心和样品（图 1），研究样品取自五峰组—龙马溪组下部。所有样品均开展了偏光显微镜观察，有机碳含量分析，双能 CT、MaipSCAN 自动矿物检测、微米 CT、高精度场发射扫描电镜、聚焦离子束—氦离子显微镜（HIM）等多尺度成像技术的实验分析，通过大量岩心的



a—上扬子大地构造区划简图；b—昭通地区位置及井位分布图

图 1　上扬子地区和昭通地区大地构造背景和位置

Fig. 1　Tectonic background and location of the Upper Yangtze Region and Zhaotong area

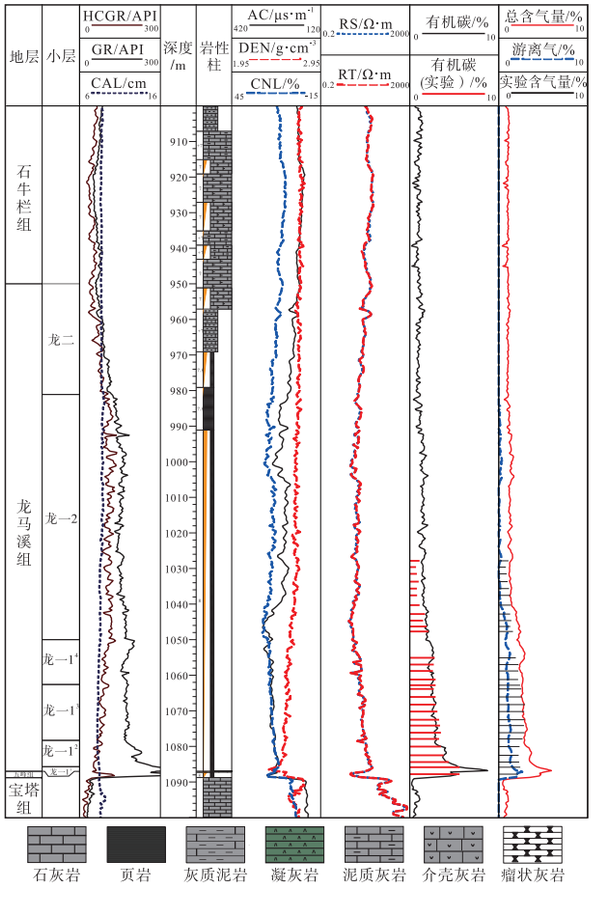


图 2　昭通地区五峰组—龙马溪组 Y103 井地层综合柱状图

Fig. 2　Comprehensive stratigraphic column of the Wufeng and Longmaxi formations of Well Y103 in Zhaotong area

“大薄片”层理、矿物及结构观察，对五峰组—龙马溪组页岩的岩性特征、分布特征以及层理特征进行分析。其中氩离子抛光片尺寸为 10 nm×10 nm×5 nm。MaipSCAN 矿物成分和 SEM 成像分析在中国科学院大学实验中心进行。样品数量和分析方法见表 1。

2.2　MaipSCAN 人工智能驱动矿物扫描分析电镜

MaipSCAN（Mineralogy by artificial intelligence powered Scanning Electron Microscopy）人工智能驱动矿物分析电镜，是国际最新一代矿物元素图像分析系统，矿物识别准确度大于 95%，能提供矿物、元素、图像、岩性、物性、脆性、弹性和甜点等多个关键岩石评价参数为同一平台的系统。

MaipSCAN 是由中科锐晨科技有限公司联合中国科学院自主研发的全新一代数字智能矿物分析系统，由扫描电镜、X 射线探测器和多种智能分析软件组成。它通过电子激发岩石原子内电子而引起的特征 X 射线，开发国际上最先进的图谱对比技术，实现快速准确自动识别矿物类型、定量分析矿物成分和背散射图像。基于矿物和图像，可实现提供孔径参数、总孔隙度、脆性指数、弹性参数、甜点识别、岩性识别和岩相划分等功能。本次研究利用 MaipSCAN 技术对昭通地区太阳气田 5 口井

表 1 昭通地区五峰组—龙马溪组采样数据和分析方法

Table 1 Sampling and analyzing methods of the Wufeng and Longmaxi formations in Zhaotong area

序号	分析测试项目	样品数/个
1	全直径岩心双能 CT 扫描分析	岩心长 318 m
2	MaipSCAN 岩心自动矿物分析	560
3	SEM 样品制备	64
4	4 nm 孔隙与有机质含量测定	64
5	1 nm 孔隙度校正量测定	64
6	微米 CT 有机质连通性测定	19
7	FIB-SEM 4 nm 孔隙连通性测定	19

（YQ11、YS206、Y104、YS118、YS207）共 560 样次进行 MaipSCAN 矿物分析。

2.3 场发射扫描电镜成像分析

通过 MaipSCAN 矿物扫描电镜分析后，选取具有代表性的样品进行微观 4 nm 分辨率的 SEM 分析。依据 SEM 分析的结果，选取具有代表性的有机质进行 1 nm 分辨率的有机孔分析。

本次开展了 5 口井共 64 样次进行微观特征分析，其中，Y104 井 18 样次，YQ11 井 17 样次，YS207 井 17 样次，YS206 井 6 样次，YS118 井 6 样次。微观表征技术包括 4 nm 的大面积 SEM 技术，分析范围为 400 μm×150 μm，1 nm 的氦离子显微镜技术 HIM，分析范围为 1μm×1μm。最后，将 4 nm 分辨率的 SEM 与 1 nm 分辨率的 HIM 进行联合表征分析，实现硅质页岩段 1～5000 nm 或更大孔缝的全孔径段的综合分析。

3 数字扫描探测结果与特征描述

3.1 生物硅质页岩宏观特征

生物硅质页岩由 2 大类水平纹层组成。在大薄片和 MaipSCAN 矿物扫描图像下，生物硅质页岩展现出明显的纹层结构，由相对较暗的泥纹层和相对较亮的粉砂纹层组成，整体连续、板状且呈平行关系。这些不同的纹层组合形成了粉砂质纹层组、砂泥间互纹层组和砂泥薄互层纹层组（图 3；图 4），共同构成了水平层理的宏观特征。

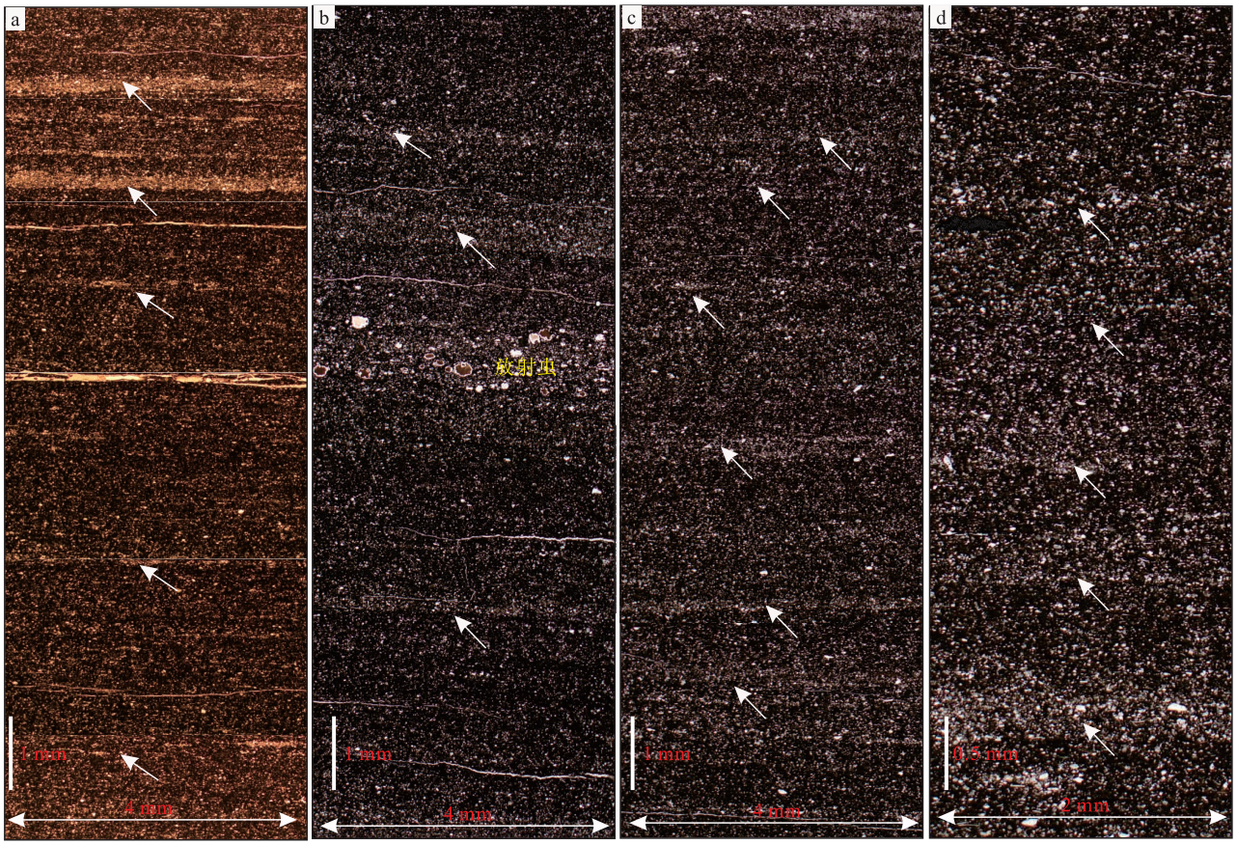
硅质页岩石英组分含量高。通过 8 个样品的 XRD 分析数据揭示，硅质页岩主要矿物成分有石英、黏土矿物、钙质类矿物等，以及少量的黄铁矿和长石。其中石英矿物含量分布在 63.04%～82.11%之间，平均为 71.2%；石英由微晶和粉砂级石英构成，微晶石英含量高达 90%。长石矿物含量为 3.02%～7.18%，平均值为 4.13%；钙质类矿物主要是方解石和白云石，总含量介于 6.29%～15.25%之间，平均值为 10.63%，其中方解石扫描电镜下颜色相对较浅，表面可见溶蚀孔，白云石相对较暗，常以规则自形晶体出现。黏土矿物以伊利石为主，含有少量绿泥石，总含量为 9.74%～21.06%之间，平均值为 15.15%。黄铁矿含量较低，介于 1.70%～4.88%之间，平均值为 3%（表 2）。

3.2 硅质页岩纹层发育特征

五峰组—龙马溪组下部的硅质页岩以泥质纹层和粉砂质纹层交替为特征（施振生等，2020）。泥质纹层的泥质含量大于 50%，由粒度小于 31.2 μm 的颗粒构成，富含黏土级矿物颗粒和微晶石英颗粒，其中微晶石英颗粒占比可高达 85%（施振生等，2018）。由于有机质含量较高，在偏光显微镜下呈暗色，因此也被称为暗纹层。而粉砂质纹层由粉砂质含量大于 50%、大小介于 31.2～62.5 μm 之间的颗粒大量聚集构成，有机质含量相对较低，在偏光显微镜下呈亮色，也称为亮纹层（Shi *et al.*，2022b）。

3.2.1 泥质纹层

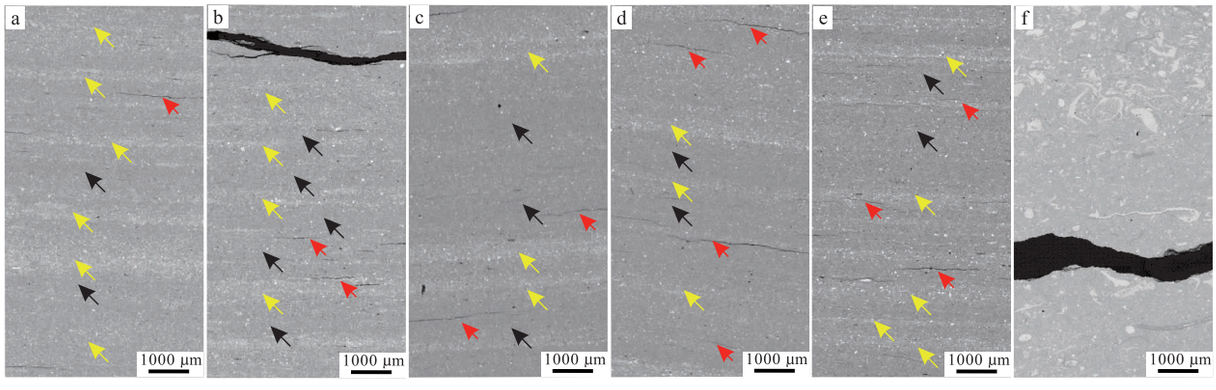
泥质纹层是由粒径小于 3.9 μm 且占层内超过 50%的颗粒构成，呈现深色，也称暗纹层（施振生等，2018）。对研究区分析样品进行场扫描电镜观察显示，泥质纹层主要由大量放射虫构成，硅藻、钙藻发育较少，石英结晶良好，大部分生物构架被硅质和有机物填充，少部分被黄铁矿填充。泥质纹层主要呈隐晶、微晶或石英集合体，石英颗粒通常为 1～3 μm，大颗粒矿物相对较少，个别呈孤立分布，最大颗粒尺寸为 31.45 μm（图 5）。在阴极发光下，石英颗粒呈微弱或不发光，局部富集黄铁矿。石英颗粒具有明显的棱角，无磨圆或无定形特征。生物富集层中存在多种粒径的混合石英颗粒，表明其不具备水动力搬运特征，暗示了在稳定水体条件下类似“海洋雪”方式垂直缓慢沉降的沉积过程。先前的研究表明，泥质纹层中生物成因硅含量超过 70%，通常形成于生物繁盛期间隔，生物硅残骸逐渐堆积导致纹层厚度增大且有机质含量高（施振生等，2020）。



a—井深 3304.46 m；b—井深 3303.43 m；c—井深 3302.25 m；d—井深 3301.44 m

图 3　昭通地区 YS207 井龙马溪组硅质页岩大薄片照片（白色箭头指示亮纹层）

Fig. 3　Macroscopic thin-section photographs of siliceous shale of the Longmaxi Formation in Well YS207 in Zhaotong area (White arrows indicate bright grain layers)



a—井深 448.34 m；b—井深 449.4 m；c—井深 450.3 m；d—井深 450.46 m；e—井深 451.9 m；f—井深 452.98 m。红色箭头指向裂缝，黄色箭头指向粉砂纹层，黑色箭头指向泥纹层

图 4　昭通地区 YQ11 井龙马溪组硅质页岩纹层 MaipSCAN 矿物扫描照片

Fig. 4　MaipSCAN mineral scanning photographs of laminated siliceous shale of the Longmaxi Formation in Well YQ11 in Zhaotong area

3.2.2　粉砂质纹层

通过对研究区硅质页岩取心大薄片和扫描电镜的观察，可以清晰地看到明显的亮暗相间、厚薄间互交替的韵律性纹层特征，这些纹层呈连续、板状、平行接触的关系。多个纹层组合形成纹层组，包括条带状粉砂组合、砂泥递变纹层组合和砂泥薄

表 2 昭通地区五峰组—龙马溪组硅质页岩样品矿物含量

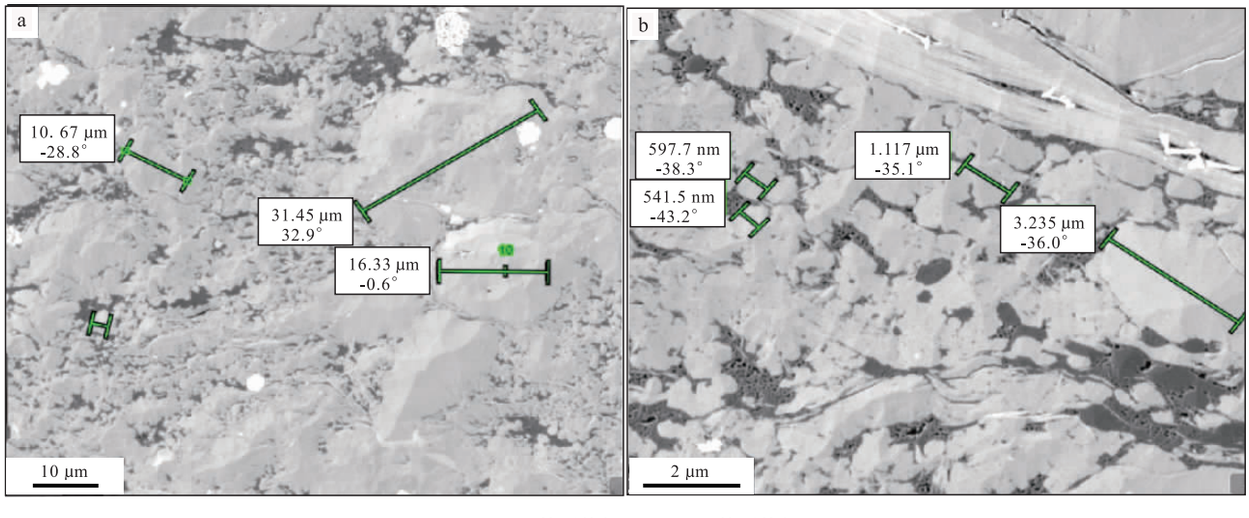
Table 2 Mineral content of siliceous shale samples of the Wufeng and Longmaxi formations in Zhaotong area

井号	井深/m	石英/%	长石/%	黏土矿物/%	总钙质类/%	黄铁矿/%
Y104	1197.72	65.83	4.51	14.96	15.01	4.20
YQ11	439.78	64.57	3.04	21.06	11.36	3.01
YQ11	449.40	66.23	3.47	13.64	15.25	4.88
Y104	1200.76	80.93	3.53	9.94	7.17	1.96
YS206	876.14	63.04	4.72	19.34	13.86	3.76
YS207	3003.68	69.23	7.18	19.60	8.49	2.69
YQ11	451.84	82.11	3.59	9.74	6.29	1.87
YS206	881.83	77.71	3.02	12.94	7.65	1.70

互层组合。沿着纹层和纹层组的界面可见水平发育的裂缝。不同纹层组的厚度差异较大，单个粉砂纹层组（亮纹层）的最大厚度可达 4 mm，而单个泥质纹层组（暗纹层）的厚度最大可达 8 mm。较厚的纹层中可观察到明显的生物碎屑和团块。进一步分析表明，粉砂质纹层可分为放射虫聚集和钙质微生物聚集 2 类。

1）放射虫粉砂质纹层。在高分辨扫描电镜下，硅质页岩的粉砂质纹层（亮纹层）是钙质微生物和放射虫的集中发育段，单个纹层厚度在 0.1 ~0.3 mm 之间。相比之下，泥质纹层（暗纹层）中硅藻、钙质微生物和放射虫的发育相对较少。通过进一步放大观察粉砂质纹层，可以看到由大量放射虫构成颗粒明显的生物碎屑和团粒，颗粒大小不一，分选性差、无磨圆、似球粒、呈现出“满天星”状态分布在暗色纹层背景中，粉砂质纹层组垂向没有明显的粒序特征。分散的放射虫颗粒在成岩演化过程中形成了粉砂级自生石英、较大的方解石和白云石矿物颗粒（图 6）。进一步放大观察，可以看到经成岩演化充填后的放射虫生物碎屑呈现出不同大小和形态的颗粒状（图 7），外部形态呈现圆形或裙边状，内部结构显示出白云石和方解石化现象，成岩矿物之间呈现线状突变、同心圆状、树枝状和花朵状，碎屑骨架和内部充填物质均为粒径小于 3.9 μm 的微晶石英。部分放射虫腔体内部充填有黑色有机质和黄铁矿。由放射虫富集形成的粉砂质纹层颗粒较大，而生物碎屑间更小粒级的石英颗粒则多呈不规则球状或椭球状，自形程度低，充填在矿物基质中，形成了由生物硅质溶解再沉淀形成的自生石英。

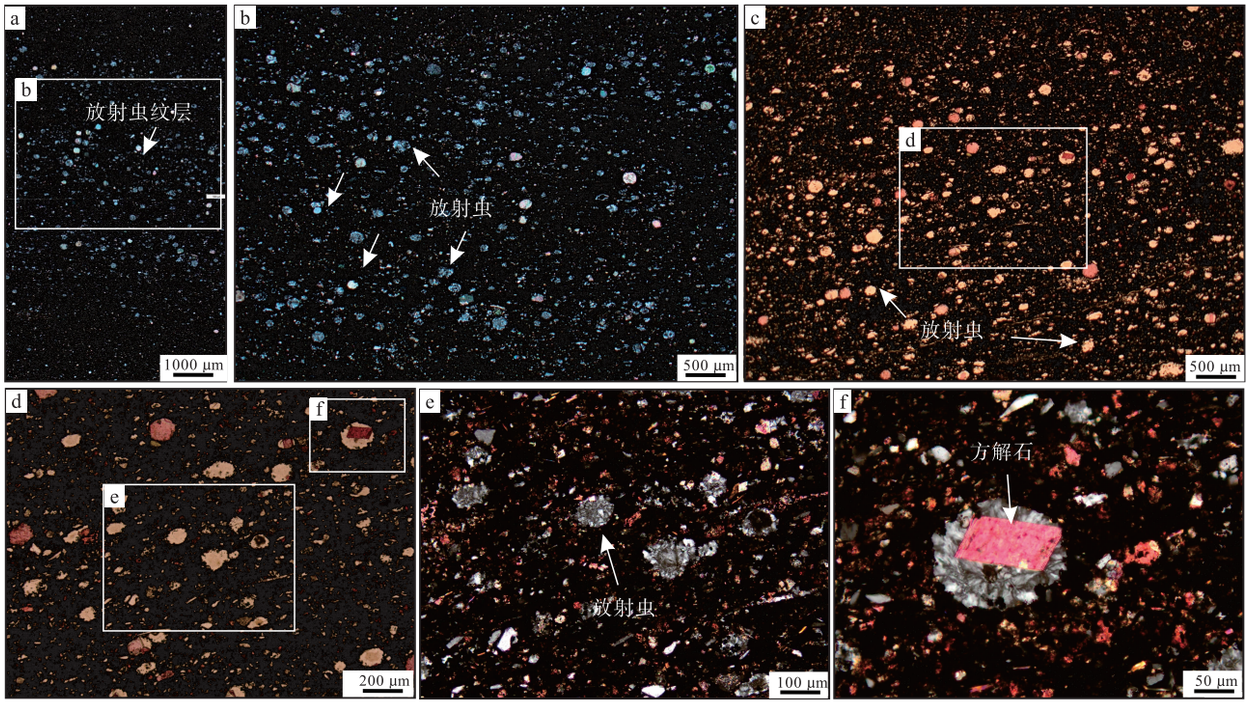
2）钙质微生物粉砂质纹层。通过扫描电镜观察发现，颗粒粒度相对较细的断续、板状、平行的粉砂质纹层主要由大量的方解石和白云石成岩矿物聚集构成，而由放射虫和海绵骨针形成的白云石和方解石数量相对较少。通过团块状或絮凝状不规则形态分析得出，这类粒度较细的粉砂质纹层可能是由钙质微生物勃发形成。进一步观察发现（图 8），红褐色的球粒状和圆环状方解石，粒径在 20 ~ 70 μm 之间，从形态上推测是钙质微生物类个体。白



a—10 μm 镜下特征；b—2 μm 镜下特征

图 5 昭通地区龙马溪组硅质页岩泥质纹层石英矿物颗粒 SEM 扫描电镜特征

Fig. 5 SEM (scanning electron microscopy) characteristics of quartz grains in siliceous shale lamina of the Longmaxi Formation in Zhaotong area



a—2.5~3 mm 大比例尺放射虫纹层；b—偏光显微镜下图 a 放大 1 倍特征；c—图 a 放大 1 倍的镜下染色特征；d-f—在偏光显微镜下图 c 逐步放大显示

图 6　昭通地区 YS206 井（深度 877.65 m）龙马溪组硅质页岩放射虫矿物光学显微镜特征照片

Fig. 6　Optical microscope images of radiolarian mineral in siliceous shale of Longmaxi Formation of Well YS206 (depth in 877.65 m) in Zhaotong area

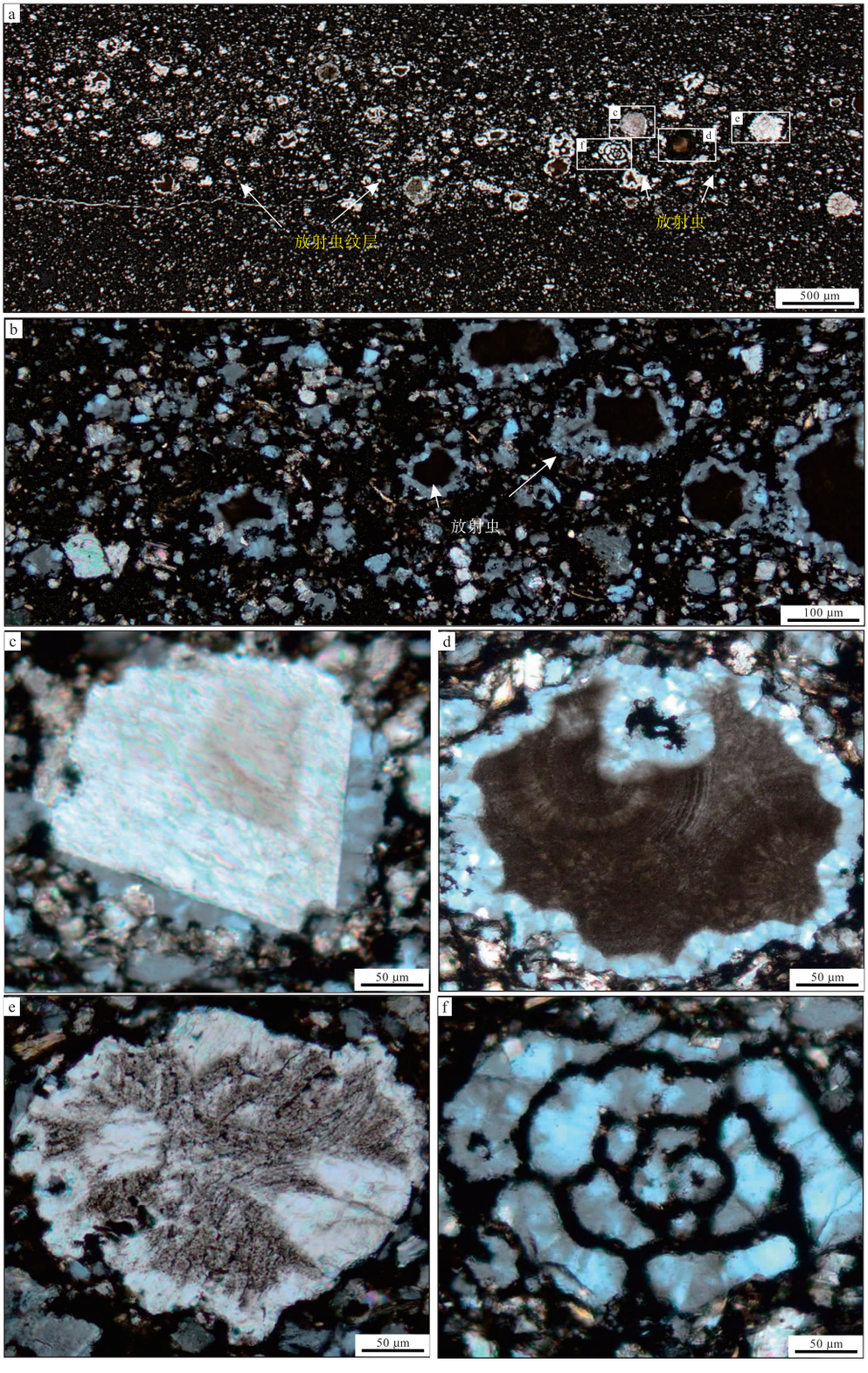
色的白云石呈他形，少量为菱形晶体，极少量呈球粒和圆环状，粒径在 15~80 μm 之间。石英主要呈碎屑状，少量呈港湾状，棱角—次棱角为主，石英碎屑呈分散态，粒径在 10~70 μm 之间。斜长石呈板状，含量较低，棱角—次棱角。钙质微生物类粉砂质纹层厚度在 100~500 μm 之间，呈断续分布，横向厚度变化不均一。

研究统计发现五峰组—龙马溪组下部生物硅质页岩中浮游藻类、疑源类、细菌和固体沥青等占总显微组分的 70%~80%。分析表明，在埋藏成岩过程中，浮游藻类逐渐形成高硬度结构的隐晶质和微晶石英、方解石和白云石的集合体。颗粒分布没有明显的粒序特征，高倍显微镜下呈现出“闪亮”特征(图 9-a，9-b)，闪亮团块富集形成亮纹层(图 9-c，9-d)，纹层厚度一般在 0.1~0.3 mm 之间。钙质微生物方解石化球形粒，零星可见黄铁矿(图 9-e，9-f)，页岩裂隙发育，裂隙宽约 10 μm。

在龙一 1^1 小层(图 10)，钙质微生物纹层构成的硅质页岩占比高达 60%。研究认为，除了放射虫的生物沉积作用外，钙质微生物的沉积作用也应该是中上扬子地区该套地层硅质页岩形成的重要原因之一。

3.3　硅质页岩分布

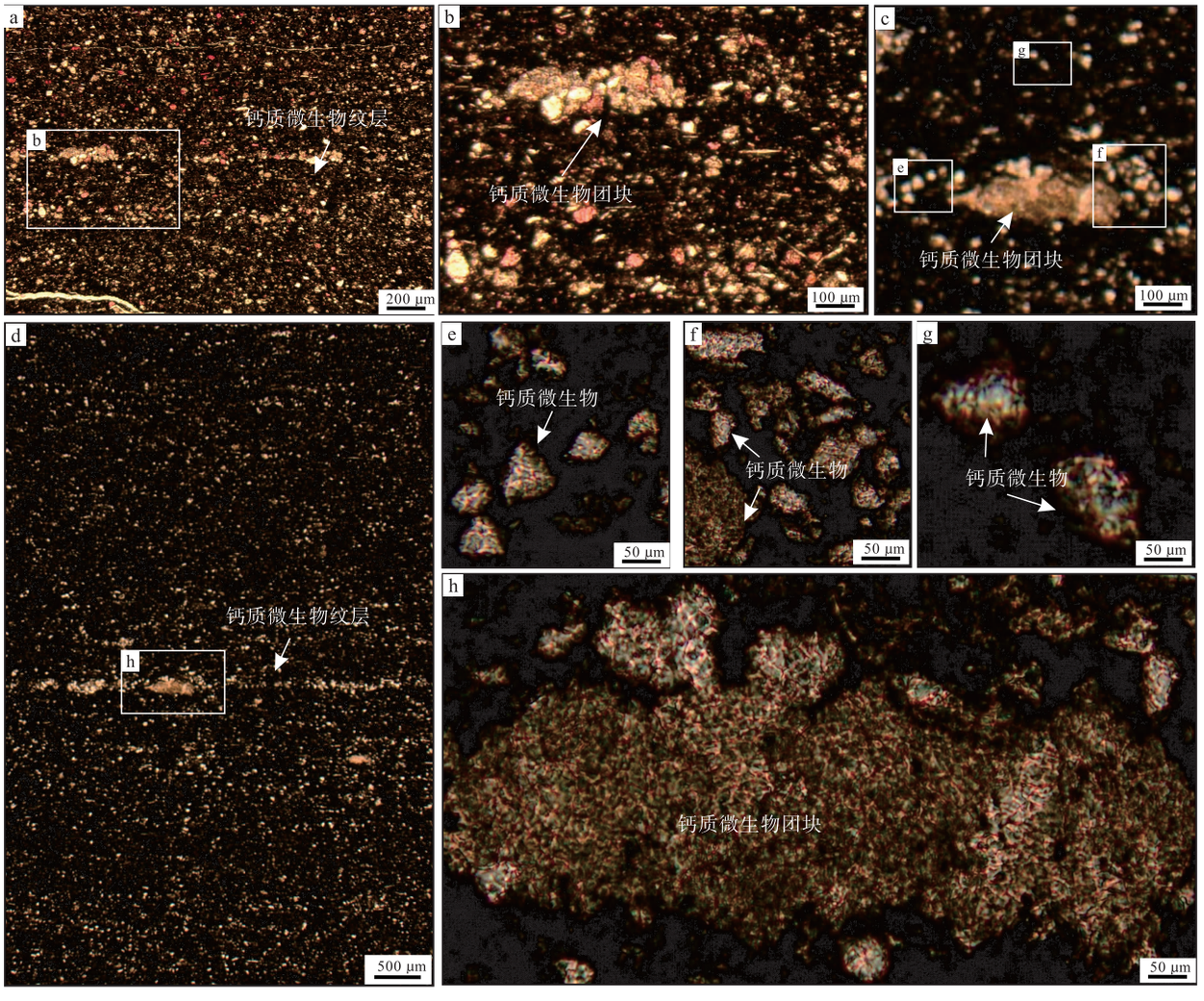
硅质页岩岩相在横向上表现出连续性和稳定性，揭示其分布广泛，为扬子克拉通前陆盆地深水陆棚环境中生物繁盛的产物(图 11)，测井特征表现为低密度、高速度和高自然伽马特征。这些页岩主要由有机质沉积组成，泥质含量较低，颗粒主要为自生内源矿物，有机质含量在 4%~14%之间，孔隙度为 2.38%~2.68%。其主要发育在龙一 1^1 小层和龙一 1^2 小层。垂向对比显示，龙一 1^1 小层和龙一 1^2 小层的有机质含量和孔隙度是龙一 1^3 小层和龙一 1^4 小层的 2~3 倍，是龙一 2 亚段的 5~10 倍。在龙一 1^1 小层中，硅质页岩占主导地位，从不同井的纵向趋势来看，龙一 1^1小层的优势段位于中下部。尽管龙一 1^1 小层并非完全由硅质页岩组成，还包含其他页岩夹



a—500 μm 比例尺下放射虫纹层；b—100 μm 比例尺下放射虫纹层；c—方解石；d-e—硅化石英；f—放射虫

图 7 昭通地区 YS207 井（深度 3003.45 m）龙马溪组硅质页岩放射虫纹层矿物结构光学显微镜特征照片

Fig. 7 Optical microscope images of radiolarian lamina mineral structure of the Longmaxi Formation siliceous shale in Well YS207 (depth in 3003.45 m) in Zhaotong area



a-d—不同分辨率下染色后钙质微生物纹层特征；e-g—单个钙质微生物；h—钙质微生物团块

图 8　昭通地区 Y104 井（深度 178.48 m）龙马溪组硅质页岩钙质微生物纹层镜下特征

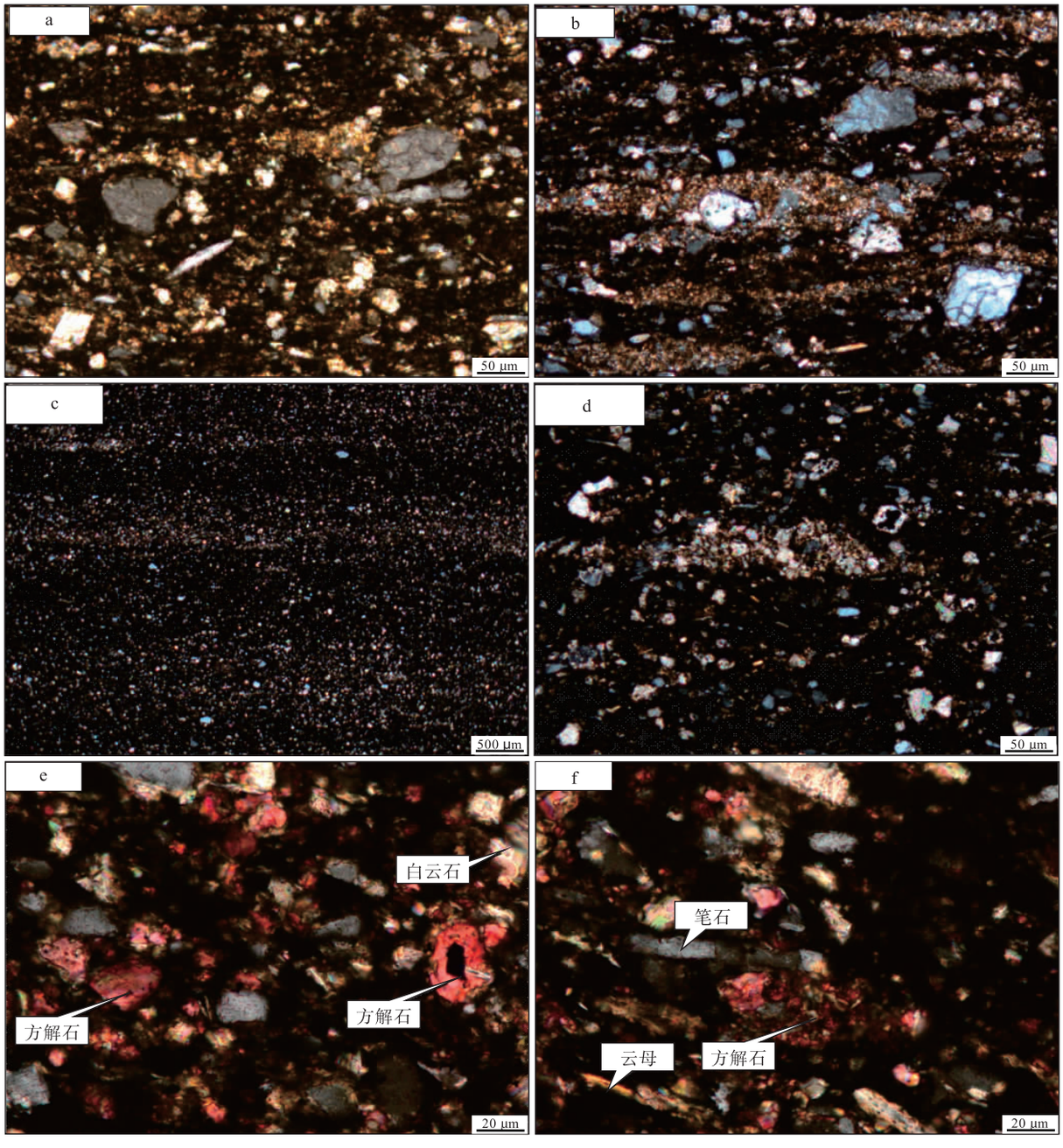
Fig. 8　Microscopic characteristics of calcimicrobe laminae in siliceous shale of the Longmaxi Formation in Well Y104 (depth in 178.48 m) in Zhaotong area

层，但在北部 Y104 井，硅质页岩占比达 80%，厚度为 1.5 m；而在南部从 YQ11 井到 YS206 井再到 YS207 井，硅质页岩的含量从 95%下降至 70%，厚度在 1.7~1.3 m 之间。龙一 1^2 小层也是硅质页岩的主要发育段，但整体含量略逊于龙一 1^1 小层，整体占比有所下降，分布主要集中在龙一 1^2 小层的下部。横向井间对比显示，北部 Y104 井的硅质页岩占比为 75%，厚度为 4 m；而南部的 YQ11 井、YS206 井和 YS207 井，硅质页岩的含量分别为 27%、40%和 20%，厚度分别为 2.7 m、3.5 m 和 1.5 m。

4　讨论

4.1　硅质页岩形成机理

硅质页岩的形成与该时期的全球海平面快速上升有密切关系。根据区域分析，五峰组—龙马溪组黑色页岩的形成分布与该时期全球海平面的升降密切相关（Wang *et al.*，2020；Chen *et al.*，2021）。这套页岩具有高 TOC 含量、高含气量、高孔隙度、高石英含量、层理和裂缝广泛发育等特征，五峰组—龙马溪组最底部广泛分布的黑色硅质页岩形成于快速海进期，且该套页岩由盆地边缘向盆地中心逐渐增厚（施振生等，2018，2020，2021，2023）。



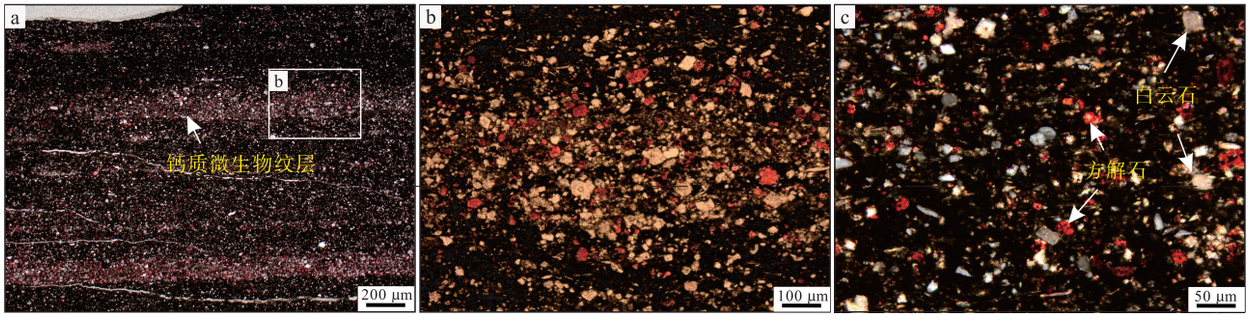
a，b—YS206 井，井深 883.66 m，白云石及方解石；c，d—YQ11 井，井深 454.3 m，白云石不同比例镜下特征；e，f—Y104 井，井深 1202.13 m，高倍镜下白云石、方解石

图 9 昭通地区五峰组硅质页岩、钙质微生物团块及方解石、白云石特征照片

Fig. 9 Microscopic photos of siliceous shale calcimicrobe clusters, calcite, and dolomite characteristics of the Wufeng Formation in Zhaotong area

页岩的平均 TOC 含量为 5.4%，呈现由盆缘向盆地中心逐渐降低的趋势。快速的海进过程可以导致浮游生物大量繁殖，引发水体缺氧和有机质富集（Jr. Coveney *et al.*, 1991; Middelburg *et al.*, 1991）。同时，海平面上升会使底层缺氧水体向浅水区扩张，进而促成富有机质页岩的大面积分布（Heckel, 1977）。

五峰组—龙马溪组黑色有机质页岩主要由硅质、方解石、白云石、黏土矿物和少量黄铁矿组成。在盆地中心位置，受陆源影响较小且水体较为



a—钙质微生物纹层；b—放大的钙质微生物纹层；c—白云石、方解石镜下特征

图 10　昭通地区 Y104 井（深度 1195.62 m）龙马溪组硅质页岩钙质微生物纹层矿物镜下特征

Fig. 10　Photographs depict mineralogical characteristics of calcimicrobe-rich laminae in siliceous shale of the Longmaxi Formation in Well Y104 (depth in 1195.62 m) in Zhaotong area

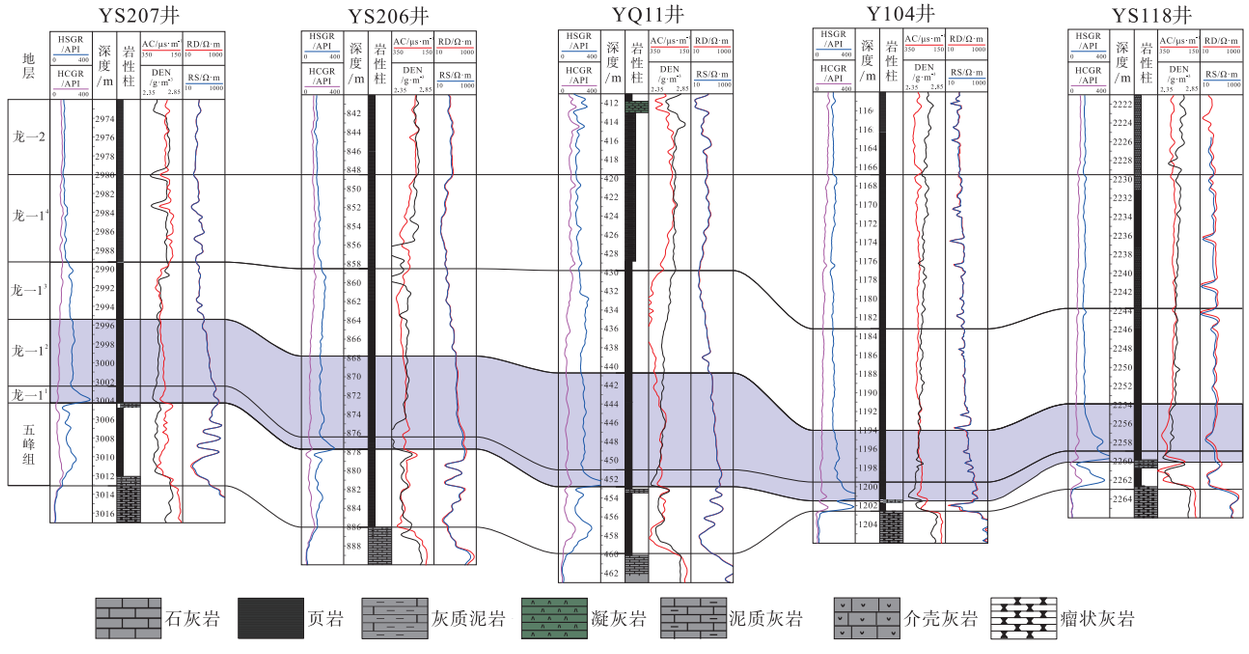


图 11　昭通地区井间硅质页岩（低密度、高速度、高自然伽马）对比图

Fig. 11　Interwell comparison diagram of siliceous shale (low density, high velocity, high natural gamma) in Zhaotong area

清洁，这种清洁的水体有利于放射虫和硅质海绵的生长（Zhang *et al.*，2015），使得硅质含量高达 60%~80%。黑色页岩中的硅质主要为生物成因，主要来源于放射虫、硅质海绵等（赵建华等，2016；卢龙飞等，2018）。结合本次研究识别的方解石和白云石富集粉砂纹层段，认为钙质微生物纹层周期性富集与放射虫、硅质海绵的大量繁殖相互作用的记录，两者共同构成了生物硅质页岩的结构。钙质微生物纹层的存在影响着页岩的物理性质和化学成分，从而对页岩的形成和性质产生影响。

在快速海进期，钙质微生物纹层的形成可能是由于海洋生态系统中生物群落的重新组织和生态位的分化（Sommer and Lengfellner，2008）。钙质微生物和放射虫等有机硅生物在生态位和生态条件上的变化，导致它们在海洋环境中的分布和生长方式发生变化，进而促进了它们之间的交互作用和共存（Huisman *et al.*，1999）。同时，快速海进期可能带来海水中营养物质的变化，如营养盐的供应增加或减少，这会影响钙质微生物和放射虫等有机硅生物的生长和繁殖。不同种类的有机硅生物对不同营养物质的利用差异，可能导致它们在不同环境条件下的优势竞争和交互作用。

硅质页岩形成分布与沉积时期的火山作用也密切相关（施振生等，2023）。五峰组—龙马溪组页岩组成与分布受火山喷发作用影响（Hu *et al.*，2009；Yang *et al.*，2019；Shi *et al.*，2022a）。在研究区钻井取心中也发现了纹层状、条带状、薄层状斑脱岩或凝灰岩沉积层，这些沉积特征的发育程度和产状受到火山活动强度、频度、期次、规模和古地貌等因素的控制。

火山作用对硅质页岩形成具有重要影响，特别是对钙质微生物纹层和放射虫纹层的交互形成。火山活动释放的营养物质如铁、钙、镁、钠、钾、磷、硫、硅和微量元素，丰富了海洋生态系统的营养矿物质组合，为海洋生物提供了良好的生长环境，促进了海洋生物的繁盛和有机质的富集。火山作用在一定程度上可以促进钙质微生物纹层的形成，因为火山喷发释放的二氧化碳和其他营养物质刺激了钙质微生物的生长与繁殖。此外，火山喷发还会释放大量的碱性物质如碳酸盐和硅酸盐，调节海水的化学性质，为钙质微生物提供适宜的生长条件。火山灰中富含的微量元素和营养物质，也可以为钙质微生物提供必要的养分，促进了钙质微生物富集纹层的形成。

此外，火山作用通过影响海洋氧含量，促使海域底层缺氧形成贫氧—缺氧、强还原—还原沉积环境，有利于有机物的保存和沉积（Oschmann，1988）。这种环境条件使得页岩富含有机质，为富有机质页岩形成提供了物质基础，进而有利于丰富页岩气的生成。

综上所述，火山作用不仅通过提供营养物质和调节海水化学性质促进钙质微生物富集纹层的形成，也通过影响海洋底层环境促进有机质页岩的形成，从而在硅质页岩的形成过程中发挥着重要的控制作用。

4.2 硅质页岩气勘探意义

4.2.1 生物勃发导致硅质页岩有机质富集

硅质页岩富有机质，是页岩气发育的甜点段。通过研究区测试数据发现，硅质页岩有机质质量含量介于 2.51%~6.69%之间，平均 4.26%；有机质体积含量介于 5.01%~13.38%之间，平均 8.53%（表 3）。有机质形态在扫描电镜下呈现出颗粒状、丝状、膜状等多样形态(图 12)。

硅质页岩的形成受到盆地碎屑沉积物供应减少的快速海进期影响，这一时期页岩中的有机碳（TOC）含量急剧增加。先前研究（Shi *et al.*，2021，2022a）表明，这一时期，海相页岩的沉积速率仅为 1.7~7.5 m/Ma，这种低速率有利于大量有机质聚集。除了保存能力增强和低沉积速率外，高初级生产力在这一过程中扮演着关键角色。晚奥陶世至早志留世期间，扬子陆架海广泛分布着藻类、放射虫和笔石等生物（Li *et al.*，2017），同时地表水中富含 Ba、P、Ni、Zn 等营养元素（Qiu and Zou，2020），这些因素共同促进了该套页岩的高生产力背景。

溶解态硅在海洋水体中扮演着重要的营养盐角色，高浓度的硅不仅是放射虫、海绵骨针等硅质生物发育和富集的基础，也是其他海洋生物生长所必需的重要营养物质。在半深水沉积条件下，放射虫大量发育的环境为浮游生物生长提供了有利条件，尤其是对于浮游藻类的生长。大量海洋调查结果表明，硅元素含量与水体中的初级生产力呈良好对应关系，硅质生物的大量发育伴随着藻类的繁荣。生物来源的硅质富集层往往处于高初级生产力层，为高质量烃源岩的形成提供了丰富的有机物质（贾国东等，2002）。

硅质页岩具有高石英含量、高孔隙度、高渗透率、高有机碳含量以及高水平渗透率与垂直渗透率之比的特征（Shi *et al.*，2022b）。尽管受到水深增加和黏土矿物含量降低的影响，有机质含量在盆地内部呈现向盆地中心方向递减的趋势。海相页岩中分散分布的有机质主要来源于海洋浮游植物，而藻类有机质向海洋沉积物的输入受透光带初级生产力和水深的影响（Calvert，1987）。通常情况下，随着水深和距离海岸线的增加，藻类有机质向底部沉积物的供应能力减弱，从而导致有机质含量的降低。

海相页岩中的生物成因硅对于高质量烃源岩的形成具有重要影响。多项研究表明，五峰组和龙马溪组下段页岩的 TOC 含量与石英含量呈明显正相关关系，生物成因硅质富集层段也是有机碳富集的层段，为高质量烃源岩的形成提供了基础。

4.2.2 有机质、有机孔含量高导致硅质页岩孔隙连通性好

硅质页岩具有良好的三维孔隙连通性，有机

表 3　昭通地区五峰组—龙马溪组硅质页岩有机质和孔隙度测试

Table 3　Organic matter and porosity of siliceous shale of the Wufeng and Longmaxi formations in Zhaotong area

序号	样品编号	井名	层段	钻井深度/m	有机质质量含量/wt%	有机质体积含量/V%	有机孔/%	无机孔/%	总孔隙度/%	有机质孔隙转化率/%	有机孔占比/%
1	Z3	Y104	龙一 1^1	1202.28	6.69	13.38	5.64	0.23	5.88	29.67	96.07
2	Z4	Y104	龙一 1^1	1200.68	4.79	9.58	3.58	0.20	3.79	27.23	94.63
3	Z5-2	Y104	龙一 1^1	1200.22	4.20	8.41	3.18	0.13	3.31	27.46	96.19
4	Z7	Y104	龙一 1^1	1199.12	3.72	7.45	3.44	0.15	3.59	31.60	95.73
5	Z8	Y104	龙一 1^2	1198.86	3.62	7.23	3.30	0.19	3.48	31.31	94.58
6	Z10	Y104	龙一 1^2	1194.46	4.00	8.00	3.10	0.47	3.57	27.92	86.89
7	C2	YS206	龙一 1^2	871.00	2.51	5.01	2.29	0.14	2.43	31.37	94.18
8	C3	YS206	龙一 1^2	873.65	3.65	7.30	2.06	0.28	2.34	22.00	88.03
9	C4	YS206	龙一 1^1	875.70	3.74	7.47	2.69	0.15	2.84	26.46	94.59
10	D4	YS118	龙一 1^1	2257.15	4.40	8.79	2.43	0.13	2.56	21.67	94.89
11	B3	YQ11	龙一 1^2	444.96	3.71	7.41	2.69	0.28	2.97	26.64	90.54
12	B7	YQ11	龙一 1^2	450.86	3.60	7.20	3.17	0.21	3.39	30.59	93.69
13	B8	YQ11	龙一 1^2	450.50	4.01	8.02	2.95	0.24	3.19	26.91	92.44
14	B9	YQ11	龙一 1^2	450.86	3.31	6.61	3.27	0.19	3.47	33.12	94.46
15	B10	YQ11	龙一 1^1	451.42	4.50	9.00	3.12	0.21	3.34	25.75	93.59
16	B12	YQ11	龙一 1^1	452.02	4.07	8.15	2.98	0.16	3.14	26.77	94.79
17	B13	YQ11	龙一 1^1	452.70	5.71	11.43	3.04	0.12	3.16	20.99	96.11
18	B14	YQ11	龙一 1^1	452.90	4.36	8.72	2.57	0.15	2.72	22.78	94.49
19	A8	YS207	龙一 1^2	2997.41	3.01	6.03	1.97	0.14	2.11	24.63	93.18
20	A9	YS207	龙一 1^2	2997.66	4.84	9.67	2.31	0.02	2.33	19.28	99.19
21	A11	YS207	龙一 1^1	2998.58	3.78	7.56	1.56	0.04	1.60	17.10	97.65
22	A13	YS207	龙一 1^1	2999.38	6.27	12.54	2.10	0.04	2.14	14.33	98.24
23	A14	YS207	龙一 1^1	2999.53	5.67	11.34	1.75	0.04	1.79	13.34	97.54

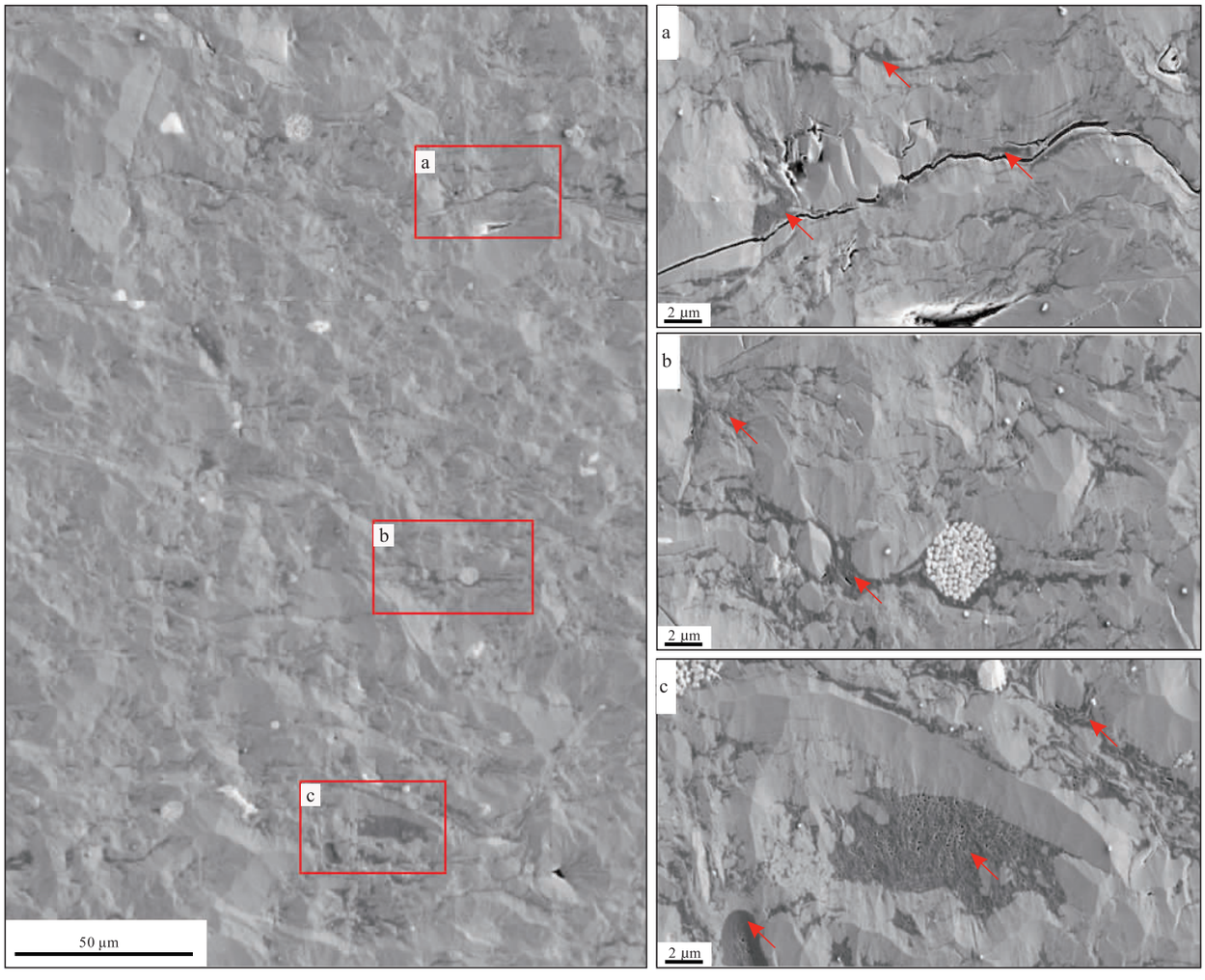
孔作为页岩气储集层主要的孔隙贡献类型（Loucks *et al.*，2012；施振生等，2021）。这种连通性的实现依赖于有机质的三维连通性。施振生等（2021）的研究指出，在四川盆地五峰组—龙马溪组龙一段海相页岩中，石英晶间孔隙度与硅质矿物含量呈正相关，同时有机孔隙度随着有机碳（TOC）含量的增加而增加。当 TOC 含量达到 5.5%时，有机孔隙度达到最大值，然后随着 TOC 的进一步增加而下降。

硅质页岩中，连通有机孔的比例较高，这表明连通性主要取决于有机质的连通性。研究表明，硅质页岩的形成过程本身就涉及大量有机质的生成。在高有机质含量（TOC）的背景下，有机质在三维空间中的连通性达到最佳状态。定量测试显示，连通有机质的占比平均约为 30%，而连通有机孔的占比则约为 60%。高连通有机质和高连通有机孔的比例共同塑造了硅质页岩孔隙空间的优越连通性（表 4；图 13）。

因此，硅质页岩在孔隙结构方面展现出独特的优势，其有机质和有机孔的连通性为页岩气提供了丰富的储集空间和气体的流动通道。

4.2.3　硅质含量高导致生物硅质页岩脆性好、可压裂性强

硅质页岩因其高石英含量、高孔隙度以及特殊的结构特征，表现出优异的脆性和强大的可压裂性，使其成为潜在的优质页岩气储集层对象。研究区硅质页岩 YQ11 井的脆性指数在 0.55～0.78 之间，平均值 0.62；可压裂指数介于 0.67～0.92 之间，平均值 0.78（表 5）。石英含量高是其脆性优势的重要因素，石英作为一种硬度高、脆性好的矿物，增强了岩石整体的脆性。同时，石英颗粒之间的结合强度高，有助于提高页岩的稳定性和抗压性。此外，硅质页岩通常具有较高的孔隙度，这为岩石的变形和压裂提供了更多的



a-c—红色箭头指示放大的镜下有机质

图 12 昭通地区五峰组—龙马溪组硅质页岩有机质扫描电镜下微观特征

Fig. 12 Microscopic characteristics of organic matter in siliceous shale under scanning electron microscope of the Wufeng and Longmaxi formations in Zhaotong area

表 4 昭通地区五峰组—龙马溪组硅质页岩孔隙连通性测试

Table 4 Porosity connectivity testing of siliceous shale of the Wufeng and Longmaxi formations in Zhaotong area

序号	样品编号	井号	钻井深度/m	连通有机质占有机质/%	连通有机质孔占有机质孔/%	1 mm^3 样品孔隙连通率/%
1	Z3	Y104	1202.28	40.22	75.67	30.43
2	B16	YQ11	456.93	52.83	59.04	30.93
3	D3	D3	3303.68	29.51	69.77	20.59

空间，同时增加了岩石的吸附和储集能力。岩石内部复杂多样的结构特征，包含各种微观结构如微裂缝、孔隙、层理等，使得硅质页岩在受到外部力作用时更容易发生断裂和压裂，在压裂作业中更易于形成裂缝网络，这些裂缝能够提供更多的气体流通路径，增加气体的释放和采集效率。

5 结论

1）上扬子昭通地区五峰组—龙马溪组的硅质页岩具有稳定且广泛的分布特征，主要矿物包括石英、长石、黏土、黄铁矿、方解石和白云石。在垂直方向上，硅质含量逐渐减少，钙质矿物含量增

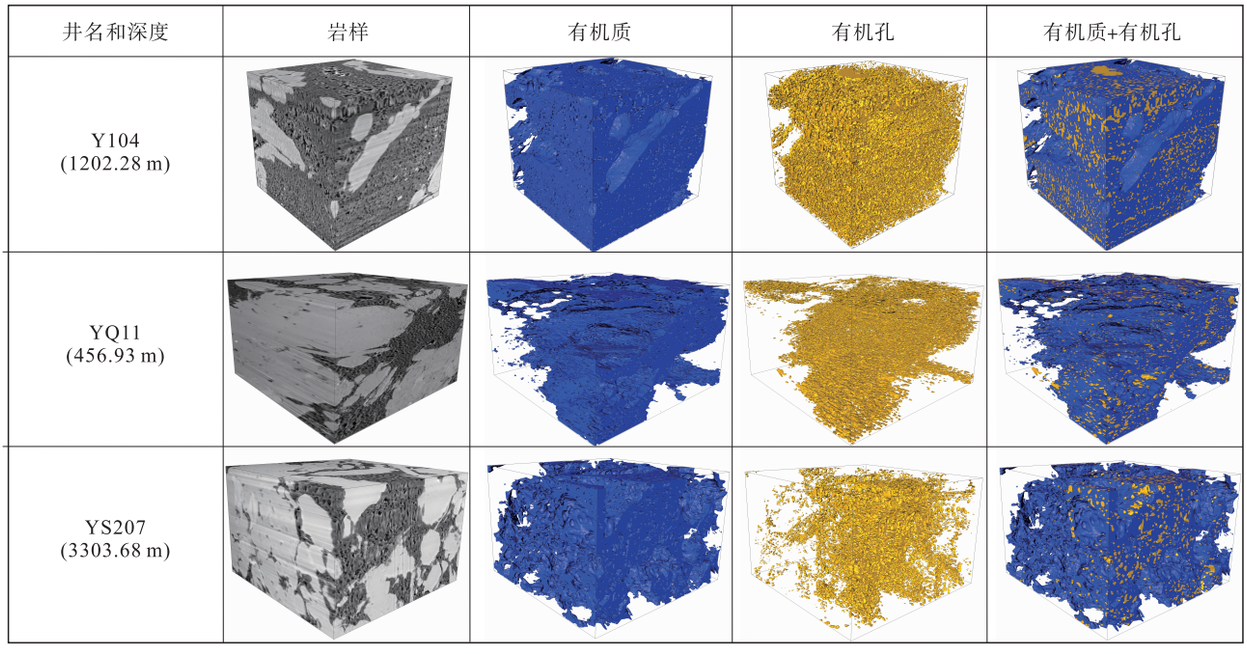


图 13　昭通地区龙马溪组硅质页岩三维空间连通性特征 FIB-SEM 照片

Fig. 13　FIB-SEM photographs depict three-dimensional spatial connectivity characteristics of siliceous shale in the Longmaxi Formation in Zhaotong area

表 5　昭通地区 YQ11 井硅质页岩脆性与可压裂指数

Table 5　Brittleness and fracturability index of siliceous shale in Well YQ11 in Zhaotong area

深度/m	440.0	440.5	441.0	441.5	442.0	442.5	443.0	443.5	444.0	444.5	445.0	445.5	446.0
脆性指数	0.64	0.66	0.58	0.62	0.66	0.70	0.60	0.59	0.56	0.54	0.59	0.60	0.56
可压裂指数	0.81	0.82	0.76	0.79	0.82	0.85	0.77	0.75	0.73	0.71	0.73	0.73	0.71
深度/m	446.5	447.0	447.5	448.0	448.5	449.0	449.5	450.0	450.5	451.0	451.5	452.0	452.5
脆性指数	0.50	0.56	0.61	0.62	0.66	0.68	0.67	0.70	0.78	0.64	0.60	0.56	0.74
可压裂指数	0.68	0.73	0.77	0.77	0.81	0.82	0.81	0.84	0.91	0.79	0.76	0.74	0.88

加，黏土矿物呈波动变化。该地区硅质页岩主要分布在龙一 1^1 和龙一 1^2 小层，硅质含量超过 50%。

2）硅质页岩呈现泥质和粉砂质纹层，其中粉砂质纹层颗粒较粗，呈现放射虫纹层和钙质微生物纹层交替特征。放射虫和海绵骨针富集纹层无粒序特征，硅质含量高且连续分布。而钙质微生物富集纹层呈现凝聚团块状，颗粒没有规则的外部形态，内部呈絮凝状，大小不一，纹层表现为断续、板状和平行状，厚度变化快。

3）生物硅质页岩的形成受到快速海进和火山活动的影响，这些因素调整营养物质和海水化学性质变化，影响生态位和生态条件，进而形成不同类型的纹层。这些页岩具有高硅质和有机质含量、高孔隙连通性、良好脆性和强压裂性特征，是页岩气勘探的首选目标。

参考文献(References)

陈科洛，张廷山，梁兴，张朝，王高成. 2018. 滇黔北坳陷五峰组—龙马溪组下段页岩岩相与沉积环境. 沉积学报，39(4)：743-755. [Chen K L，Zhang T S，Liang X，Zhang C，Wang G C. 2018. Analysis of shale lithofacies and sedimentary environment on Wufeng Formation-Lower Longmaxi Formation in Dianqianbei Depression. Acta Sedimentologica Sinica，39(4)：743-755]

董大忠，施振生，孙莎莎，郭长敏，张晨晨，郭雯，管全中，张梦琪，蒋珊，张磊夫，马超，武瑾，李宁，昌燕. 2018. 黑色页岩微裂缝发育控制因素：以长宁双河剖面五峰组—龙马溪组为例. 石油勘探与开发，45(5)：763-774. [Dong D Z，Shi Z S，Sun S S，Guo C M，Zhang C C，Guo W，Guan Q Z，Zhang M Q，Jiang S，Zhang L F，

Ma C, Wu J, Li N, Chang Y. 2018. Factors controlling microfractures in black shale: a case study of Ordovician Wufeng Formation-Silurian Longmaxi Formation in Shuanghe Profile, Changning area, Sichuan Basin, SW China. Petroleum Exploration and Development, 45(5): 763-774]

郭彤楼. 2016. 中国式页岩气关键地质问题与成藏富集主控因素. 石油勘探与开发,43(3): 317-326. [Guo T L. 2016. Key geological issues and main controls on accumulation and enrichment of Chinese shale gas. Petroleum Exploration and Development,43(3): 317-326]

李新景,吕宗刚,董大忠,程克鹏. 2009. 北美页岩气资源形成的地质条件. 天然气工业,29(5): 27-32. [Li X J, Lü Z G, Dong D Z, Cheng K P. 2009. Geologic controls on accumulation of shale gas in North America. Natural Gas Industry,29(5): 27-32]

刘树根,李智武,孙玮,邓宾,罗志立,王国芝,雍自权,黄文明. 2011. 四川含油气叠合盆地基本特征. 地质科学,46(1): 233-257. [Liu S G, Li Z W, Sun W, Deng B, Luo Z L, Wang G Z, Yong Z Q, Huang W M. 2011. Basic geological features of superimposed basin and hydrocarbon accumulation in Sichuan Basin, China. Chinese Journal of Geology,46(1): 233-257]

贾国东,彭平安,傅家谟. 2002. 珠江口百年来富营养化加剧的沉积记录. 第四纪研究,22(2): 158-165. [Jia G D, Peng P A, Fu J M. 2002. Sedimentary records of accelerated eutrophication for the last 100 years at the peral river estuary. Quaternary Science,22(2): 158-165]

梁兴,叶熙,张介辉,舒红林. 2011. 滇黔北坳陷威信凹陷页岩气成藏条件分析与有利区. 石油勘探与开发,38(6): 693-699. [Liang X, Ye X, Zhang J H, Shu H L. 2011. Reservoir forming conditions and favorable exploration zones of shale gas in the Wexin sag, Dianqianbei Depression. Petroleum Exploration and Development, 38(6): 693-699]

梁兴,张廷山,舒红林,闵华军,张朝,张磊. 2020. 滇黔北昭通示范区龙马溪组页岩气资源潜力评价. 中国地质,47(1): 72-87. [Liang X, Zhang T S, Shu H L, Min H J, Zhang Z, Zhang L. 2020. Evaluation of shale gas resource potential of Longmaxi Formation in Zhaotong national shale gas demonstration area in the northern part of Dianqianbei depression. Geology in China,47(1): 72-87]

梁兴,单长安,张朝,徐政语,徐进宾,王维旭,张介辉,徐云俊. 2021. 昭通太阳背斜山地浅层页岩气“三维封存体系”富集成藏模式. 地质学报,95(11): 3380-3399. [Liang X, Shan C A, Zhang Z, Xu Z Y, Xu J B, Wang W X, Zhang J H, Xu Y J. 2021. “Three-dimensional closed system” accumulation model of Taiyang anticline mountain shallow shale gas in Zhaotong demonstration area. Acta Geologica Sinica,95(11): 3380-3399]

卢龙飞,秦建中,申宝剑,腾格尔,刘伟新,张庆珍. 2018. 中上扬子地区五峰组—龙马溪组硅质页岩的生物成因证据及其与页岩气富集的关系. 地学前缘,25(4): 226-236. [Lu L F, Qin J Z, Shen B J, Tenger, Liu W X, Zhang Q Z. 2018. The origin of biogenic silica in siliceous shale from Wufeng-Longmaxi Formation in the Middle and Upper Yangtze region and its relationship with shale gas enrichment. Earth Science Frontiers,25(4): 226-236]

施振生,邱振,董大忠,卢斌,梁萍萍,张梦琪. 2018. 四川盆地巫溪 2 井龙马溪组含气页岩细粒沉积纹层特征. 石油勘探与开发,45(2): 339-348. [Shi Z S, Qiu Z, Dong D Z, Lu B, Liang P P, Zhang M Q. 2018. Laminae characteristics of gas-bearing shale fine-grained sediment of the Silurian Longmaxi Formation of Well Wuxi 2 in Sichuan Basin, SW China. Petroleum Exploration and Development,45(2): 339-348]

施振生,董大忠,王红岩,孙莎莎,武瑾. 2020. 含气页岩不同纹层及组合储集层特征差异性及其成因: 以四川盆地下志留统龙马溪组一段典型井为例. 石油勘探与开发,47(4): 829-840. [Shi Z S, Dong D Z, Wang H Y, Sun S S, Wu J. 2020. Reservoir characteristics and genetic mechanisms of gas-bearing shales with different laminae and laminae combinations: a case study of Member 1 of the Lower Silurian Longmaxi shale in Sichuan Basin, SW China. Petroleum Exploration and Development,47(4): 829-840]

施振生,武瑾,董大忠,孙莎莎,郭长敏,李贵中. 2021. 四川盆地五峰组—龙马溪组重点井含气页岩孔隙类型与孔径分布. 地学前缘,28(1): 249-260. [Shi Z S, Wu J, Dong D Z, Sun S S, Guo C M, Li G Z. 2021. Pore types and pore size distribution of the typical Wufeng-Longmachi shale wells in the Sichuan Basin, China. Earth Science Frontiers,28(1): 249-260]

施振生,赵圣贤,赵群,孙莎莎,周天琪,程峰,施少军,武瑾. 2022. 川南地区下古生界五峰组—龙马溪组含气页岩岩心裂缝特征及其页岩气意义. 石油与天然气地质,43(5): 1087-1101. [Shi Z S, Zhao S X, Zhao Q, Sun S S, Zhou T Q, Cheng F, Shi S J, Wu J. 2022. Fractures in cores from the Lower Paleozoic Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin and their implications for shale gas exploration. Oil & Gas Geology,43(5): 1087-1101]

施振生,王红岩,赵圣贤,周天琪,赵群,祁灵. 2023. 川南地区上奥陶统—下志留统五峰组—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 Formations in southern Sichuan Basin, China. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 25(4): 788-805]

赵建华,金之钧,金振奎,温馨,耿一凯,颜彩娜. 2016. 四川盆地五峰组—龙马溪组含气页岩中石英成因研究. 天然气地球科学,27(2): 377-386. [Zhao J H, Jin Z J, Jin Z K, Wen X, Geng Y K, Yan C N. 2016. The genesis of quartz in Wufeng-Longmaxi gas shales, Sichuan Basin. Natural Gas Geoscience,27(2): 377-386]

邹才能,赵群,董大忠,杨智,邱振,梁峰,王南,黄勇,端安详,张琴,胡志明. 2017. 页岩气基本特征、主要挑战与未来前景. 天然气地球科学,28(12): 1781-1796. [Zou C N, Zhao Q, Dong D Z, Yang Z, Qiu Z, Liang F, Wang N, Huang Y, Duan A X, Zhang Q, Hu Z M. 2017. Geological characteristics, main challenges and future prospect of shale gas. Natural Gas Geoscience,28(12): 1781-1796]

Brenchley P J, Marshall J D, Carden G, Robertson D B R, Long D G F, Meidla T, Hints L, Anderson T F. 1994. Bathymetric and isotopic evidence for a short-lived Late Ordovician glaciation in a greenhouse period. Geology, 22(4): 295-298.

Chen L, Jiang S, Chen P, Chen X, Zhang B, Zhang G, Lin W, Lu Y. 2021. Relative sea-level changes and organic matter enrichment in the Upper Ordovician-Lower Silurian Wufeng-Longmaxi Formations in the Central Yangtze area, China. Marine and Petroleum Geology, 124: 104809.

Calvert S E. 1987. Oceanographic controls on the accumulation of organic matter in marine sediments. Geological Society, London, Special Publications, 26(1): 137-151.

Hu Y, Sun W, Ding X, Wang F, Ling M, Liu J. 2009. Volcanic event at the Ordovician-Silurian boundary: the message from K-bentonite of Yangtze Block. Acta Petrologica Sinica, 25(12): 3298-3308.

Huisman J Jonker R R, Zonneveld C, Weissing F J. 1999. Competition for light between phytoplankton species: experimental tests of mechanistic theory. Ecology, 80(1): 211-222.

Heckel P H. 1977. Origin of phosphatic black shale facies in Pennsylvanian cyclothems of mid-continent North America. AAPG Bulletin, 61(7): 1045-1068.

Jr. Coveney R M, Watney W L, Maples C G. 1991. Contrasting depositional models for Pennsylvanian black shale discerned from molybdenum abundances. Geology, 19(2): 147-150.

Li Y, Zhang T, Ellis G, Shao D. 2017. Depositional environment and organic matter accumulation of Upper Ordovician-Lower Silurian marine shale in the Upper Yangtze Platform, South China. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 466: 252-264.

Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, Hammes U. 2012. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores. AAPG Bulletin, 96(60): 1071-1098.

Middelburg J J, Calvert S E, Karlin R. 1991. Organic-rich transitional facies in silled basins: response to sea-level change. Geology, 19(7): 679-682.

Oschmann W. 1988. Kimmeridge clay sedimentation: a new cyclic model. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 65(3-4): 217-251.

Qiu Z, Zou C. 2020. Controlling factors on the formation and distribution of "sweet-spot areas" of marine gas shales in South China and a preliminary discussion on unconventional petroleum sedimentology. Journal of Asian Earth Sciences, 194: 103989.

Rong J Y, Harper D A T, Huang B, Li R Y, Zhang X L, Chen D. 2020. The latest Ordovician Hirnantian brachiopod faunas: new global insights. Earth-Science Reviews, 208: 103280.

Shi Z, Wang H, Sun S, Guo C. 2021. Graptolite zone calibrated stratigraphy and topography of the late Ordovician-early Silurian Wufeng Lungmachi shale in Upper Yangtze area, South China. Arabian Journal of Geosciences, 14: 213.

Shi Z, Zhao S, Zhou T, Ding L, Sun S, Cheng F. 2022a. Mineralogy and geochemistry of the Upper Ordovician and Lower Silurian WufengLongmaxi shale on the Yangtze Platform, south China: implications for provenance analysis and shale gas sweet-spot interval. Minerals, 12(10): 1190.

Shi Z, Zhou T, Wang H, Sun S. 2022b. Depositional structures and their reservoir characteristics in the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin, China. Energies, 15(5): 1618.

Sommer U, Lengfellner K. 2008. Climate change and the timing, magnitude, and composition of the phytoplankton spring bloom. Global Change Biology, 14(6): 1199-1208.

Wang G, Jin Z, Liu G, Liu Q, Liu Z, Wang H, Liang X, Jiang T, Wang R. 2020. Geological implications of gamma ray (GR) anomalies in marine shales: a case study of the Ordovician-Silurian Wufeng-Longmaxi succession in the Sichuan Basin and its periphery, Southwest China. Journal of Asian Earth Sciences, 199: 104359.

Yang S, Hu W, Wang X, Jiang B, Yao S, Sun F, Huang Z, Zhu F. 2019. Duration, evolution, and implications of volcanic activity across the Ordovician-Silurian transition in the Lower Yangtze region, South China. Earth and Planetary Science Letters, 518: 13-25.

Yao W, Li Z, Li W. 2014. Detrital provenance evolution of the Ediacaran-Silurian Nanhua foreland basin, South China. Gondwana Research, 28(4): 1449-1465.

Zhang L, Wang R, Chen M, Liu J, Zeng L, Xiang R, Zhang Q. 2015. Biogenic silica in surface sediments of the South China Sea: controlling factors and paleoenvironmental implications. Deep Sea Research Part Ⅱ. Topical Studies in Oceanography, 122: 142-152.

Zhang T, Shen Y, Algeo T. 2010. High-resolution carbon isotopic records from the Ordovician of South China: links to climatic cooling and the Great Ordovician Biodiversification Event (GOBE). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 289(1-4): 102-112.

Zhou L, Kang Z, Wang Z, Peng Y, Xiao H. 2017. Sedimentary geochemical investigation for paleoenvironment of the Lower Cambrian Niutitang Formation shales in the Yangtze Platform. Journal of Petroleum Science and Engineering, 159: 376-386.

（责任编辑　郑秀娟）