引用格式：王浩，杨峰，余瑜，等. 四川盆地筇竹寺组页岩石英成因机制及油气地质意义[J]. 油气藏评价与开发，XXXX，XX(XX)：
Wang Hao，Yang Feng，Yu Yu，et al. Genetic mechanism and petroleum geological significance of quartz in shale of Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development，XXXX，XX(XX)：
DOI：10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.20260101

四川盆地筇竹寺组页岩石英成因机制及油气地质意义

王 浩[1]，杨 峰[1]，余 瑜[1]，何建华[1]，沈 杰[2]，熊 亮[3]，马滨洋[4]，徐 浩[1]
（1.成都理工大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室，四川 成都 610059；2.中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院，黑龙江 大庆 163712；3.中国石化西南油气分公司，四川 成都 610041；4.中曼石油天然气集团股份有限公司油田事业部，上海 201306）

摘要：下寒武统筇竹寺组页岩是四川盆地继五峰—龙马溪组之后又一极具勘探潜力的海相页岩层系。石英作为海相页岩中最常见、最重要的矿物之一，其硅质来源及含量对有机质富集及孔隙发育具有重要影响。本文以井研—资阳地区筇竹寺组页岩为对象，综合运用X射线衍射、场发射扫描电镜、主微量元素分析等测试手段，对研究区页岩石英开展成因划分、硅质来源定量分析，探讨不同硅质来源石英对储层品质的影响。结果表明：①研究区筇竹寺组页岩主要物源来自康滇古陆，整体沉积与成岩过程受热液活动影响微弱，经历中等化学风化作用，古气候湿度、古海洋水体还原性从井研到资阳呈现增强的趋势，使得资阳地区筇竹寺组页岩储层较井研地区有机质更富集、储集性能更优。②根据石英形态、晶体大小及阴极发光强度（CL）可将研究区页岩石英分为：陆源碎屑石英、次生加大石英、生物碎屑石英及微晶石英，其硅质主要源于陆源输入、生物硅质演化及黏土矿物转化。定量结果显示，陆源输入石英占81%、生物石英占14%、S-I（蒙脱石伊利石化）成因石英占5%，陆源输入强度高。③不同硅质来源石英对筇竹寺组页岩储层影响存在显著差异。陆源碎屑石英稀释有机质，且不利于孔隙发育；生物石英为有机质提供支撑保护与赋存空间，同时增强页岩抗压性，对孔隙起保护作用；S-I成因石英对有机质具有双重作用，井研地区筇竹寺组S-I成因石英保护作用占优，资阳地区破坏作用更显著，整体上S-I成因石英充填胶结孔隙，抑制孔隙发育。研究成果旨在厘清研究区筇竹寺组页岩石英的成因机理，揭示不同成因石英对储层的影响规律，为该地区页岩储层有利层段识别与页岩气勘探开发提供地质依据。

关键词：四川盆地；寒武系；筇竹寺组；成因机制；硅质来源；页岩气；石英；生物成因
中图分类号：TE122　　**文献标识码**：A

Genetic mechanism and petroleum geological significance of quartz in shale of Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin

Wang Hao[1], Yang Feng[1], Yu Yu[1], He Jianhua[1], Shen Jie[2], Xiong Liang[3], Ma Bingyang[4], Xu Hao[1]

(1. Chengdu University of Technology, State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu, Sichuan 610059, China;
2. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Oilfield Limited Company, Daqing, Heilongjiang 163712, China;
3. Sinopec Southwest Oil & Gas Company, Chengdu, Sichuan 610041, China;
4. Oilfield Division, Zhongman Petroleum and Natural Gas Group Co., Ltd., Shanghai 201306, China)

Abstract: The Lower Cambrian Qiongzhusi Formation shale is another marine shale series with great exploration potential in the Sichuan Basin after the Wufeng-Longmaxi Formation. Quartz is one of the most common and important minerals in marine shale, and its siliceous source and content have an important influence on organic matter enrichment and pore development. This paper takes the shale of Qiongzhusi Formation in Jingyan-Ziyang area as the object, and comprehensively uses X-ray diffraction, field emission scanning electron microscopy, main and trace element analysis and other test methods to carry out genetic classification and quantitative analysis of siliceous sources of shale quartz in the study area, and to explore the influence of quartz from different siliceous sources on reservoir quality. The results show that : (1) The main source of the Qiongzhusi Formation shale in the study area is from the Kangdian ancient land. The overall deposition and diagenesis process is weakly affected by the thermal fluid activity. It has experienced moderate chemical weathering. The paleoclimate humidity and paleo-ocean water body reducibility show an increasing trend from Jingyan to Ziyang, which makes the

收稿日期：2026-08-10。
第一作者简介：王浩（2000—），男，在读硕士研究生，主要从事非常规油气地质学研究。地址：四川省成都市成华区二仙桥东三路1号，邮政编码：610059。E-mail：1664106088@qq.com
通信作者简介：徐浩（1990—），男，博士，副教授，主要从事油气田开发地质研究。地址：四川省成都市成华区二仙桥东三路1号，邮政编码：610059。E-mail：xuhao19@cdut.edu.cn
基金项目：国家科技重大专项（2025ZD1403903-02）；国家自然科学基金（42472189）。

Qiongzhusi Formation shale reservoir in Ziyang area more enriched in organic matter and better reservoir performance than that in Jingyan area.(2) According to the quartz morphology, crystal size and cathodoluminescence intensity (CL), the shale quartz in the study area can be divided into : terrigenous detrital quartz, overgrowth quartz, bioclastic quartz and microcrystalline quartz. The siliceous is mainly derived from terrigenous input, biosilica evolution and clay mineral transformation. The quantitative results show that terrigenous input quartz accounts for 81%, bio-quartz accounts for 14%, and S-I quartz (Smectite-to-Illitequartz) accounts for 5%. The terrigenous input intensity is high. (3) There are significant differences in the influence of quartz from different siliceous sources on the shale reservoirs of Qiongzhusi Formation. Terrestrial clastic quartz dilutes organic matter and is not conducive to pore development ; bio-quartz provides support protection and storage space for organic matter, while enhancing the compressive strength of shale and protecting pores. S-I quartz has a dual effect on organic matter. The protection effect of S-I quartz in Qiongzhusi Formation in Jingyan area is dominant, and the destruction effect in Ziyang area is more significant. On the whole, S-I quartz fills the cemented pores and inhibits the development of pores. The research results aim to clarify the genetic mechanism of shale quartz in the Qiongzhusi Formation in the study area, reveal the influence of different genetic quartz on the reservoir, and provide geological basis for the identification of favorable intervals of shale reservoirs and the exploration and development of shale gas in this area.

Keywords: Sichuan Basin; Cambrian; Qiongzhusi Formation; genetic mechanism; silica source; shale gas; quartz; biogenic origin

页岩储层品质受矿物组分与成岩作用的控制[1-2]。石英作为页岩中最主要的矿物之一,其成因复杂、形态多异,据前人研究可将石英分为陆源碎屑石英、生物成因石英以及成岩自生石英3大类[3-4]。其中,陆源碎屑石英主要来自地壳风化产物或火山灰;生物成因石英的硅质源于硅质生物溶解后的再沉淀;成岩过程中,长英质矿物溶蚀、黏土矿物转化及火山-热液活动都会为成岩自生石英提供硅质来源[5-7]。不同成因石英对页岩储层孔隙发育和有机质富集的影响也存在差异。陆源碎屑石英的输入会裹挟有机质,同时可作为刚性框架保护碎屑颗粒与其他矿物之间的粒间孔隙及微裂缝[8-9];生物成因石英形成的刚性格架可有效抵抗压实,对有机质孔起到保护作用,同时其伴生的粒间孔能为有机质提供赋存空间[10-11];成岩自生石英及其聚集体内部残留的孔隙能为有机质提供赋存空间,并对有机质孔网络的发育起到支撑作用[12-13]。针对四川盆地上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩石英的研究中Dong等[14]指出次生加大石英以及镶嵌于黏土矿物间的微晶石英对孔隙具有一定保护作用,但其贡献相对有限;李凯强[15]认为群集自生微晶石英间的孔隙构成了运移有机质的储集空间,并制约了其展布范围。综上所述,厘清石英成因机制对于重建页岩成岩过程及明确页岩油气储集层形成机制具有重要意义。

四川盆地寒武系筇竹寺组海相页岩是继志留系龙马溪组之后又一个具备良好勘探开发前景的重点层系[16-17]。目前,针对四川盆地五峰组—龙马溪组中海相页岩石英的研究已趋于成熟,但关于筇竹寺组海相页岩石英的显微形貌特征、成因类型划分、不同硅质来源的定量分析等方面的研究仍显薄弱,缺乏对不同成因石英储层贡献的系统性认识。因此,本文以四川盆地井研—资阳为研究区,综合运用扫描电镜、X射线衍射、主微量元素分析等多种测试手段,对研究区页岩中石英进行成因类型划分、形貌特征描述、硅质来源识别与定量分析,并结合储层参数与微观特征,阐明不同硅质来源石英对储层的具体影响。研究预期成果有望为井研—资阳地区筇竹寺组页岩储层有利层段的识别与开发提供理论依据。

1 地质背景

井研—资阳地区筇竹寺组构造上处于德阳—安岳裂陷槽西南段与乐山—龙女寺古隆起西侧斜坡带的叠合区域,构造-沉积演化主要受盆地基底构造格局及早古生代板块运动控制[18-19]。早寒武世,在扬子板块被动大陆边缘伸展背景下,北东至南西向展布的德阳—安岳裂陷槽成为区域沉积中心[20]。研究区位于该裂陷槽向西南延伸的斜坡过渡带,处于“三台夹两槽”区域沉积格局中的海相沉积区。区域上主要发育滨岸—海槽—陆棚沉积体系,其中海槽体系是筇竹寺组页岩发育的核心单元,进一步划分为浅水缓坡、深水缓坡、槽盆及陡坡4个亚相(图1)。井研地区位于拉张槽西斜坡带,主要发育浅水缓坡相沉积;资阳地区位于拉张槽槽内,以深水缓坡相为主。研究区筇竹寺组发育灰色泥岩、粉砂质泥岩、深灰色页岩、灰质粉砂岩、灰—浅灰色粉砂岩,泥质粉砂岩不等厚互层,根据岩性、电性、沉积构造等特征,划分为11个小层[21-23]。康滇古陆作为研究区筇竹寺组沉积的主要物源区,物源类型以长英质岩浆岩为主,物源供给稳定且强度适中,为页岩沉积提供了充足的陆源碎屑物质,造就了区域筇竹寺组典型的高长英质页岩特征[24-25]。受物源距离分异影响,井研地区靠近康滇古陆物源区,陆源碎屑输入强,长英质矿物含量更高且矿物颗粒偏粗;资阳地区距物源区较远,深水环境进一步抑制陆源碎屑输入,长英质含量略有降低。

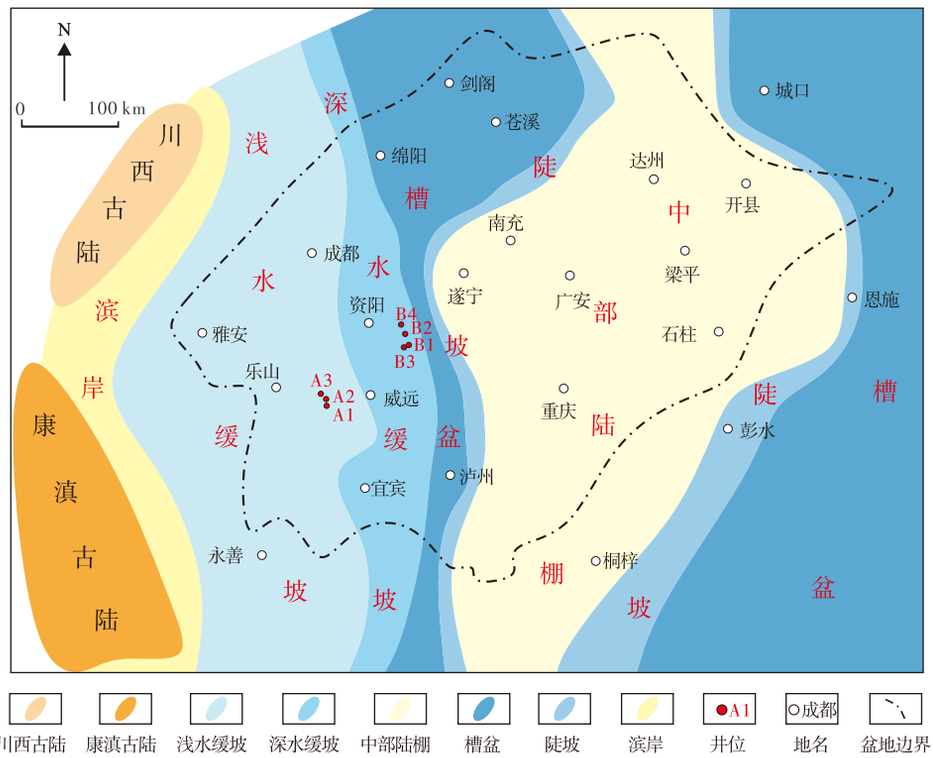


图1　四川盆地井研—资阳地区筇竹寺组沉积格局

Fig. 1　Sedimentary Framework of the Qiongzhusi Formation in the Jingyan-Ziyang Area, Sichuan Basin

2　样品及实验方法

本文以井研—资阳地区A2井、B2井筇竹寺组页岩为研究对象，系统开展矿物组成、有机地球化学、储层物性、元素地球化学及微观结构测试分析。X射线衍射分析采用DMAX-3C型衍射仪，配套JAD5.0全谱拟合分析系统，依据中华人民共和国石油天然气行业标准《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物X射线衍射分析方法》(SY/T 5163-2018)完成矿物定量；总有机碳含量采用CS-230碳硫分析仪，依据中华人民共和国国家标准《沉积岩中总有机碳测定》(GB/T 19145—2022)进行测定；孔隙度依托Poro PDP-200覆压孔隙度渗透率测试仪，依据中华人民共和国国家标准《页岩孔隙度、渗透率和饱和度测定》(GB/T 34533—2023)进行测试；主、微量元素分别采用ICP-AES(PerkinElmer Optima 5300V)与ICP-MS(Agilent 7700e)进行测定。鉴于研究层段寒武系页岩缺乏镜质组，等效镜质体反射率(R_o)由沥青反射率换算得到，即采用配备J&M MSP200系统的ZEISS Imager A2m偏光荧光显微镜，依据中华人民共和国石油天然气行业标准《沉积岩中镜质体反射率测定方法》(SY/T 5124—2012)测定油浸反射光下沥青反射率并取多点平均值，再按公式R_o=(BR_o+0.244 3)/1.049 5换算为等效镜质体反射率[26]；岩石薄片制备遵循中华人民共和国石油天然气行业标准《岩石制片方法》(SY/T 5913—2021)，采用AxioSkop 40型偏光显微镜，依据中华人民共和国石油天然气行业标准《岩石薄片鉴定》(SY/T 5368—2016)开展显微观察与图像采集；场发射扫描电镜分析采用FEI Quanta 250 FEG型设备(加速电压介于0.05～30.00 kV，束流为200 nA)，结合能谱分析系统完成微区形貌与成分联合表征。

3　结果

3.1　矿物组成

XRD(X射线衍射)测试结果表明，研究区筇竹寺组页岩具有高石英含量(平均40.5%)、低长石含量(平均24.7%)、低黏土矿物含量(平均24.4%)特征。区域分布上，井研地区页岩石英含量相对较高，平均43.3%(介于36.2%～48.5%)，资阳地区平均37.9%(介于29.6%～44.2%)；长石含量呈相反趋势，井研地区平均23.3%(介于16.8%～27.5%)，资阳地区平均26.0%(介于20.9%～36.3%)；黏土矿物由伊利石(介于22%～62%，平均45.9%)、伊蒙混层(介于7%～37%，平均18.2%)及绿泥石(介于22%～62%，平均35.9%)组成，且资阳地区黏土矿物含量(平均26.9%)稍高于井研地区(平均21.7%)。

3.2 有机地球化学特征

研究区有机质类型主要为Ⅱ$_1$～Ⅰ型,R_o(镜质体反射率)介于2.58%～2.79%,平均2.66%,井研、资阳两地区差异较小,均处于过成熟阶段,同时有机质丰度较低,整体TOC(总有机碳)含量介于0.12%～1.64%,平均0.90%,呈现显著的地域分异特征,表现为深水缓坡的资阳地区TOC含量显著高于浅水缓坡的井研地区。井研地区页岩TOC含量介于0.12%～0.54%,平均0.34%;资阳地区页岩TOC含量介于1.11%～1.64%,平均1.42%(表1)。

表1 四川盆地井研—资阳地区筇竹寺组页岩有机地化参数

Table 1 Shale organic geochemical parameters of Qiongzhusi Formation in Jingyan–Ziyang area, Sichuan Basin

地区	井名	腐泥组/%		壳质组/%	镜质组/%	类型指数	类型	R_o/%	ω(TOC)/%
		腐泥无定形	浮游藻质体						
井研	A2	78～85	0	0～21	0～15	73.8～89.0	Ⅱ$_1$～Ⅰ	2.66～2.79	0.12～0.54
资阳	B2	84～90	0	0	10～16	72.0～82.5	Ⅱ$_1$～Ⅰ	2.58～2.64	1.11～1.64

注:ω(TOC)为总有机碳含量,%。

3.3 元素地球化学特征

研究区筇竹寺组页岩中主量元素氧化物以SiO_2的含量最高,平均60.04%,Al_2O_3含量次之,平均为14.20%,Fe_2O_3(5.13%)、CaO(3.51%)、MgO(3.11%)、K_2O(3.10%)、Na_2O(2.56%)、TiO_2(0.70%)、P_2O_5(0.22%)、MnO(0.13%)平均含量依次减少。资阳地区SiO_2含量(平均62.41%)稍高于井研地区(平均56.48%),与澳大利亚后太古宙平均页岩(PAAS)SiO_2含量(62.80%)较接近(表2)。微量、稀土元素Co、Rb、Mo、Hf、U、Sr、Ba、Zr、Ni、V、Cr、Sc、La、Th平均含量分别为12.85、102.70、6.10、2.48、5.26、132.46、977.84、79.09、43.30、115.20、98.52、11.79、28.51、

表2 四川盆地井研—资阳地区筇竹寺组页岩主量元素数据

Table 2 Major element data of Qiongzhusi Formation shale in Jingyan–Ziyang area, Sichuan Basin

地区	Al_2O_3含量/%	CaO含量/%	Fe_2O_3含量/%	MgO含量/%	Na_2O含量/%	K_2O含量/%	SiO_2含量/%	P_2O_5含量/%	TiO_2含量/%	MnO含量/%	Al/(Fe+Al)	Fe/Ti	化学蚀变指数
井研	15.59	3.29	4.33	4.54	1.49	4.69	58.18	0.23	0.93	0.09	0.73	5.41	63.12
	15.63	3.28	4.09	4.43	1.66	4.85	63.55	0.23	1.01	0.08	0.74	4.69	63.38
	15.02	6.52	3.51	2.91	2.88	2.13	55.91	0.13	0.40	0.39	0.76	10.23	53.78
	14.25	2.10	7.67	5.57	1.66	3.60	51.74	0.37	1.00	0.03	0.58	8.95	55.49
	16.15	2.38	4.39	6.68	1.77	4.18	61.48	0.44	1.12	0.01	0.74	4.58	65.41
	14.79	8.94	3.43	2.62	3.70	2.05	53.15	0.14	0.33	0.19	0.77	12.17	47.93
	14.34	5.59	2.18	6.12	2.43	3.91	60.39	0.37	0.95	1.20	0.83	2.68	58.44
	15.54	6.02	4.29	2.85	3.03	2.08	55.51	0.14	0.35	0.09	0.73	14.44	53.81
	12.67	7.24	3.59	3.71	2.46	3.67	54.61	0.21	0.73	0.10	0.73	5.70	48.81
	13.72	6.33	3.84	4.36	2.15	3.79	55.23	0.25	0.85	0.09	0.73	5.29	52.69
	12.94	10.79	2.86	4.36	1.83	3.39	52.17	0.22	0.72	0.01	0.77	4.65	45.53
	13.00	9.85	3.16	2.00	2.85	2.33	55.88	0.16	0.34	0.29	0.76	10.73	45.05
资阳	14.00	1.47	5.16	2.60	1.84	3.30	67.10	0.22	0.75	0.06	0.67	8.01	62.31
	13.63	1.47	5.16	2.48	1.80	3.19	67.27	0.18	0.72	0.06	0.67	8.42	61.79
	13.71	1.62	5.43	2.70	1.61	3.28	64.43	0.17	0.69	0.06	0.66	9.13	61.29
	12.89	1.92	5.06	2.48	1.76	3.00	65.56	0.18	0.70	0.07	0.66	8.39	59.59
	15.66	1.94	6.27	2.36	2.72	2.80	61.76	0.16	0.63	0.07	0.65	11.55	58.89
	15.32	1.45	6.06	2.19	2.98	2.69	62.88	0.16	0.64	0.05	0.66	10.99	59.36
	15.36	1.58	5.86	2.27	2.79	2.76	60.62	0.18	0.63	0.07	0.66	10.79	60.02
	15.19	1.92	6.11	2.43	3.22	2.86	59.05	0.16	0.61	0.06	0.65	11.68	57.45
	14.90	1.88	5.97	2.45	3.44	2.82	58.15	0.16	0.60	0.06	0.65	11.60	56.89
	14.97	1.74	5.93	2.35	3.30	2.72	58.96	0.16	0.60	0.06	0.65	11.49	57.71
	13.37	2.12	6.54	2.59	2.42	3.23	65.24	0.21	0.75	0.08	0.61	10.16	54.68
	13.36	1.43	7.13	2.75	2.23	3.16	65.62	0.21	0.77	0.06	0.59	10.85	55.32
	15.78	0.61	7.35	3.22	1.79	3.90	61.46	0.18	0.79	0.05	0.62	10.94	61.81

9.56 μg/g，其中资阳地区Mo、U含量（平均为10.79 μg/g、8.33 μg/g）远高于井研地区（平均为1.03 μg/g、1.94 μg/g）（表3）。

3.4　石英类型

近年来研究表明，页岩中石英来源较为复杂，具有多成因特征[3-5]。根据石英形态、晶体大小及阴极发光强度（CL），将研究区筇竹寺组页岩石英划分为陆源碎屑石英与自生石英（次生加大石英、生物碎屑石英及微晶石英）。陆源碎屑石英粒径通常比自生石英大，且在阴极发光中，陆源碎屑石英发强光，自生石英弱发光—不发光[27]。

3.4.1　陆源碎屑石英

陆源碎屑石英是由物源区母岩经风化剥蚀、机械搬运后在沉积盆地内以机械沉降方式形成[5-6]。研究区可见大量粉砂级陆源碎屑石英颗粒呈层状或基质分散分布（图2），粒径范围主要分布在5～40 μm，其中，5～<20 μm粒级区间资阳地区占比高于井研地区，20～40 μm粒级区间井研地区占比更高，表明井研地区陆源碎屑石英颗粒整体粒径更大（图3）。

3.4.2　次生加大石英

次生加大石英常沿碎屑石英边缘发育（图4），多呈“球根状”向相邻的黏土矿物中延伸，在阴极发光下碎屑石英发强光，次生加大石英发弱光—不发光（图4c）。加大边通常小于2 μm，部分超过3 μm的被认为形成于搬运沉积之前，超过了埋藏成岩作用可能产生的孔隙空间范围[28]。

3.4.3　微晶石英

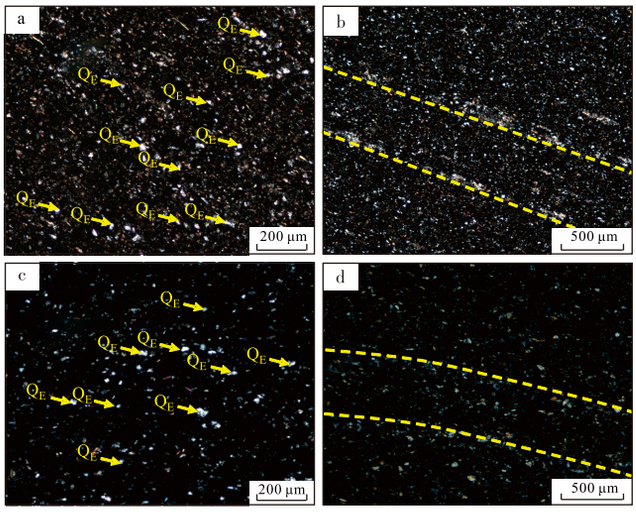
微晶石英作为筇竹寺组页岩中最常见的自生石英，根据扫描电镜下晶体形态与粒径差异，可划分为微米级和纳米级微晶石英[7]。微米级微晶石英粒径介于1～5 μm，晶体形态呈自形—它形，多群集充填于页岩孔隙

表3　四川盆地井研—资阳地区筇竹寺组页岩代表性微量及稀土元素数据

Table 3　Representative trace and rare earth element data of Qiongzhusi Formation shale in Jingyan-Ziyang area, Sichuan Basin

地区	Co含量/(μg/g)	Rb含量/(μg/g)	Mo含量/(μg/g)	Hf含量/(μg/g)	U含量/(μg/g)	Sr含量/(μg/g)	Ba含量/(μg/g)	Zr含量/(μg/g)	Ni含量/(μg/g)	V含量/(μg/g)	Cr含量/(μg/g)	Sc含量/(μg/g)	La含量/(μg/g)	Th含量/(μg/g)	C_{value}	U_{EF}	Mo_{EF}
井研	14.47	115.66	2.02	6.06	2.74	102.77	616.67	183.25	39.14	115.48	226.19	14.28	30.44	10.44	0.31	1.58	1.88
	12.19	103.89	1.44	3.63	2.61	100.68	584.43	141.67	30.94	99.29	147.13	12.63	27.40	10.19	0.29	0.68	1.13
	12.29	149.99	1.87	5.79	2.97	90.10	649.41	197.66	30.04	77.20	75.14	12.37	21.32	11.33	0.27	0.99	1.77
	12.35	82.83	0.52	1.95	2.06	96.75	585.21	73.82	25.80	82.51	93.39	9.56	42.10	10.27	0.59	0.57	1.73
	8.49	73.34	0.60	1.34	1.46	99.15	621.97	46.85	21.07	73.69	118.31	9.98	39.09	10.10	0.29	1.11	1.93
	5.05	57.88	0.60	1.71	1.59	135.66	519.43	59.30	14.08	42.35	48.98	6.73	32.32	8.90	0.20	0.77	0.54
	8.94	82.62	0.36	1.79	1.56	98.02	575.93	82.09	21.45	72.24	74.57	9.44	35.81	9.99	0.19	1.19	1.39
	7.95	61.43	0.84	2.09	1.50	130.52	536.45	78.68	16.62	52.84	121.04	7.67	29.77	8.95	0.31	0.79	1.01
	9.27	86.94	1.48	2.46	1.52	130.10	568.23	89.99	22.57	57.78	58.75	8.69	20.79	6.52	0.21	1.05	0.82
	12.24	106.04	1.14	3.42	1.97	137.21	589.66	116.52	28.27	82.68	96.44	10.38	23.30	8.78	0.23	2.27	4.44
	7.80	68.76	0.78	2.13	1.47	292.64	396.87	73.33	17.34	49.35	42.24	7.48	27.43	5.02	0.14	1.18	2.01
	6.22	62.18	0.68	3.16	1.78	113.68	638.48	71.27	23.49	67.98	75.92	7.74	22.09	8.17	0.20	1.16	2.63
资阳	15.23	103.69	10.65	1.79	9.90	114.70	1 158.23	50.87	74.16	150.83	96.03	12.39	20.89	9.05	0.54	8.14	27.16
	14.11	106.02	9.50	1.87	9.59	118.76	1 250.55	54.14	46.62	125.64	94.40	12.96	23.37	9.73	0.55	8.11	24.90
	15.40	117.86	8.45	1.90	7.30	129.60	1 316.52	55.83	47.26	138.22	101.63	14.34	23.96	9.84	0.57	6.14	22.03
	14.42	101.47	10.58	1.79	8.49	131.76	1 199.21	53.41	63.34	163.86	94.58	12.69	21.46	9.17	0.53	7.59	29.31
	15.14	111.83	8.56	2.16	7.51	144.88	1 292.57	57.75	45.45	139.71	98.97	13.54	24.65	9.61	0.61	5.53	19.54
	15.38	105.31	9.69	2.02	9.27	129.48	1 279.82	60.39	45.24	123.41	91.16	12.53	23.19	9.35	0.62	6.96	22.57
	15.47	110.94	10.20	1.76	7.97	131.94	1 356.12	49.47	58.61	134.49	100.17	13.48	24.48	9.14	0.60	5.97	23.70
	16.03	132.91	9.50	2.46	7.29	152.61	1 606.66	69.73	73.76	172.15	105.43	15.93	30.35	11.42	0.56	5.52	22.32
	16.14	129.09	10.05	2.48	7.37	148.62	1 449.64	69.62	73.95	219.66	103.25	15.20	27.25	10.30	0.55	5.70	24.08
	15.55	116.23	13.23	2.20	10.34	146.99	1 414.35	62.43	72.35	142.61	103.60	14.19	27.99	9.37	0.57	7.96	31.58
	16.05	107.27	10.61	1.77	5.47	157.35	1 339.65	49.12	46.63	111.03	98.84	12.30	39.16	10.46	0.61	4.72	28.35
	17.63	115.24	17.81	1.77	9.03	142.60	1 308.22	51.86	57.93	123.84	98.60	13.36	35.87	10.24	0.72	7.79	47.60
	17.45	158.00	11.39	2.53	8.74	134.92	1 591.90	78.21	86.30	261.04	98.36	14.84	38.20	12.77	0.73	6.38	25.77

注：C_{value}为古气候指数；U_{EF}为铀富集系数；Mo_{EF}为钼富集系数。



注：a为陆源碎屑石英分散分布，B2井，4 637.92 m；b为陆源碎屑石英呈层状分布，B2井，4 620.15 m；c为陆源碎屑石英分散分布，A2井，3 557.53 m；d为陆源碎屑石英呈层状分布，A2井，3 510.96 m；Q_E为陆源碎屑石英；黄色虚线为陆源碎屑石英分布趋势线。

图2　四川盆地井研—资阳地区筇竹寺组陆源碎屑石英光学显微镜图

Fig. 2　Optical microscope images of terrigenous clastic quartz of Qiongzhusi Formation in Jingyan-Ziyang area, Sichuan Basin

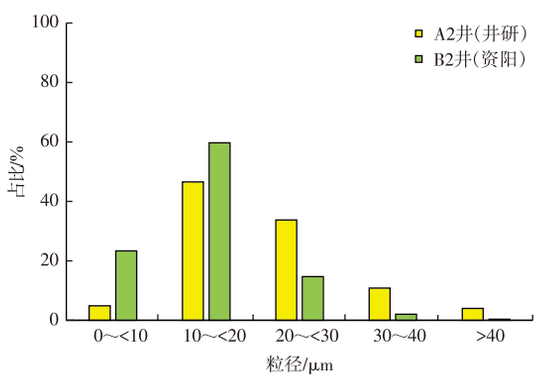


图3　四川盆地井研—资阳地区筇竹寺组陆源碎屑石英粒径分布

Fig. 3　Grain size distribution of terrigenous detrital quartz of Qiongzhusi Formation in Jingyan-Ziyang area, Sichuan Basin

中与有机质共存，但也存在以单晶形式分布于黏土矿物之间（图4d—图4i）。纳米级微晶石英形态多呈它形，数个纳米级微晶石英常交互生长，形成簇状集合体。这些簇状集体及分散的纳米级石英常与自生黏土矿物共生（图4d、图4g）。

3.4.4　生物碎屑石英

海水或孔隙水SiO_2欠饱和条件下，先存硅质生物溶解释放出SiO_2随流体迁移，对邻近的生物碎屑（如钙质壳体）进行硅化交代，形成生物碎屑石英[29]。光学显微镜下可见球形、棒形及Y形海绵骨针，球形骨针直径约40 μm，轴腔明显且充填有机质；棒形与Y形骨针轴腔常与外界连通并充填有机质，长轴介于100～1 000 μm，短轴介于20～100 μm（图5）。

4　讨论

4.1　沉积环境特征及对储层品质影响

4.1.1　物源

稀土元素因化学性质稳定且受后期成岩改造影响微弱，是示踪沉积岩物源属性的经典地球化学指标[30-31]。研究区筇竹寺组页岩样品在La/Th与Hf物源判别图解中主要投点于长英质-基性岩混合物源区及其周边，仅一个样品分布于安山岩岛弧物源区附近；结合Co/Th与La/Sc图版投点特征进一步分析，结果显示研究区源岩主体为长英质岩浆岩，同时混有少量基性岩组分的贡献（图6）。综合四川盆地物源供给格局及研究区内岩性变化特征，确定井研—资阳地区筇竹寺组的主要物源来自西侧的康滇古陆。

4.1.2　古气候

古气候驱动的物源区风化条件差异是控制碎屑岩沉积组成的关键因素之一[34]。化学风化过程中，Ca^{2+}、Na^{+}、K^{+}等活动性较强的阳离子易被淋失，Al^{3+}、Ti^{4+}等难溶元素则相对富集于风化残余物中。基于上述元素地球化学行为的差异性，化学蚀变指数被广泛用于定量反演物源区岩石的化学风化强度[35-37]，其计算公式如下：

$$CIA = \left[Al_2O_3/(Al_2O_3 + CaO^{*} + Na_2O + K_2O)\right] \times 100 \quad (1)$$

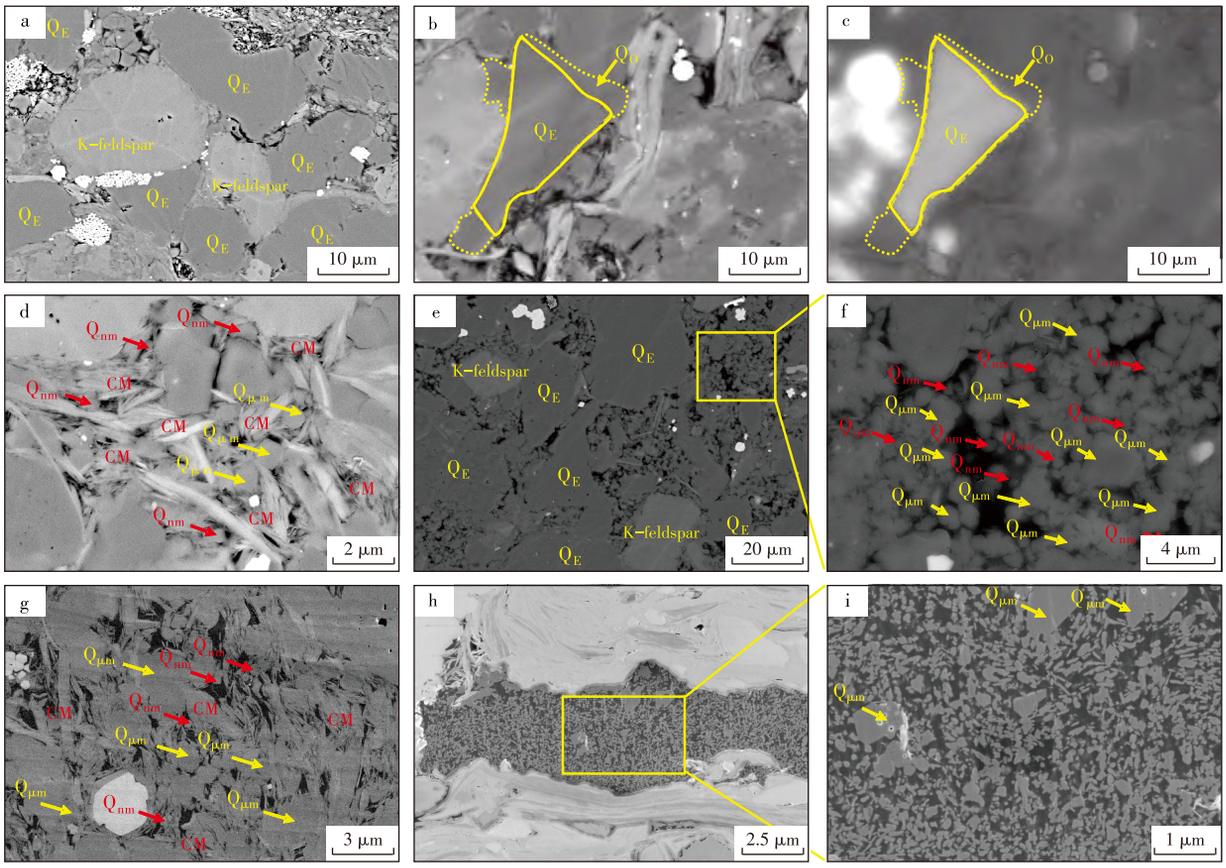
式中：*CIA*为化学蚀变指数；CaO*为仅硅酸盐矿物中的CaO。

结合A-CN-K（Al_2O_3-CaO*+Na_2O-K_2O）三端元图解分析（图6c），研究区筇竹寺组页岩样品投点集中，风化趋势线平行于A-CN连线并向A端元延伸，表明成岩过程中未发生明显钾交代作用，物源区风化作用过程稳定，整体处于中等化学风化程度。但传统化学蚀变指数主要指示化学风化强度，对古湿度的区分能力有限，近年来大量学者运用古气候指数识别环境湿度变化，公式如下[38]：

$$C_{value} = \Sigma(Fe + Mn + Cr + Ni + V + Co)/\Sigma(Ca + Mg + K + Na + Sr + Ba) \quad (2)$$

式中：C_{value}为古气候指数。

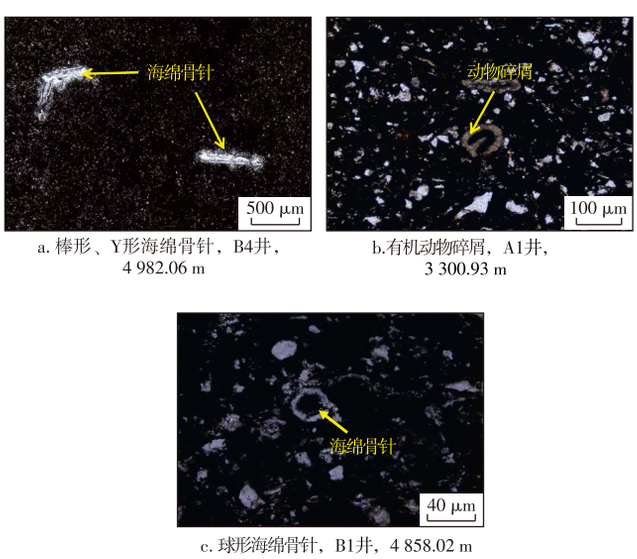
前人研究表明：Sr/Cu>10指示干热气候，Sr/Cu<10指示偏温湿气候，Sr/Cu=10为临界值；C_{value}<0.2指示干旱环境，0.2≤C_{value}<0.4为半干旱环境，0.4≤C_{value}<0.6为半干旱—半潮湿环境，0.6≤C_{value}<0.8为半潮湿环境，C_{value}≥0.8为潮湿环境[39]。温暖湿润的古气候通常会加剧化学风化作



注：a为陆源碎屑石英，B2井，4 700.23 m；b为石英次生加现象，Z-12井；c为图4b的扫描电镜阴极发光照片，陆源碎屑石英发强光，次生加大边不发光—微弱发光；d为与黏土矿物共生的自生石英，B2井，4 625.97 m；e为被有机质包裹的自生石英，B3井，4 513.80 m；f为图4e的局部放大照片，自生石英大量发育；g为与黏土矿物共生的自生石英，A1井，3 297.73 m；h为生物碎屑内部发育大量被有机质包裹的自生石英，A3井，3 447.94 m；i为图4h的局部放大照片，自生石英大量发育；Q_E为陆源碎屑石英；Q_O为石英次生加大边；$Q_{\mu m}$为微米级微晶石英；Q_{nm}为纳米级微晶石英；CM为黏土矿物；K-feldspar为钾长石。

图4　四川盆地井研—资阳地区筇竹寺组不同类型石英扫描电镜图

Fig. 4　SEM images of different types of quartz in Qiongzhusi Formation, Jingyan-Ziyang area, Sichuan Basin



a. 棒形、Y形海绵骨针，B4井，4 982.06 m

b.有机动物碎屑，A1井，3 300.93 m

c. 球形海绵骨针，B1井，4 858.02 m

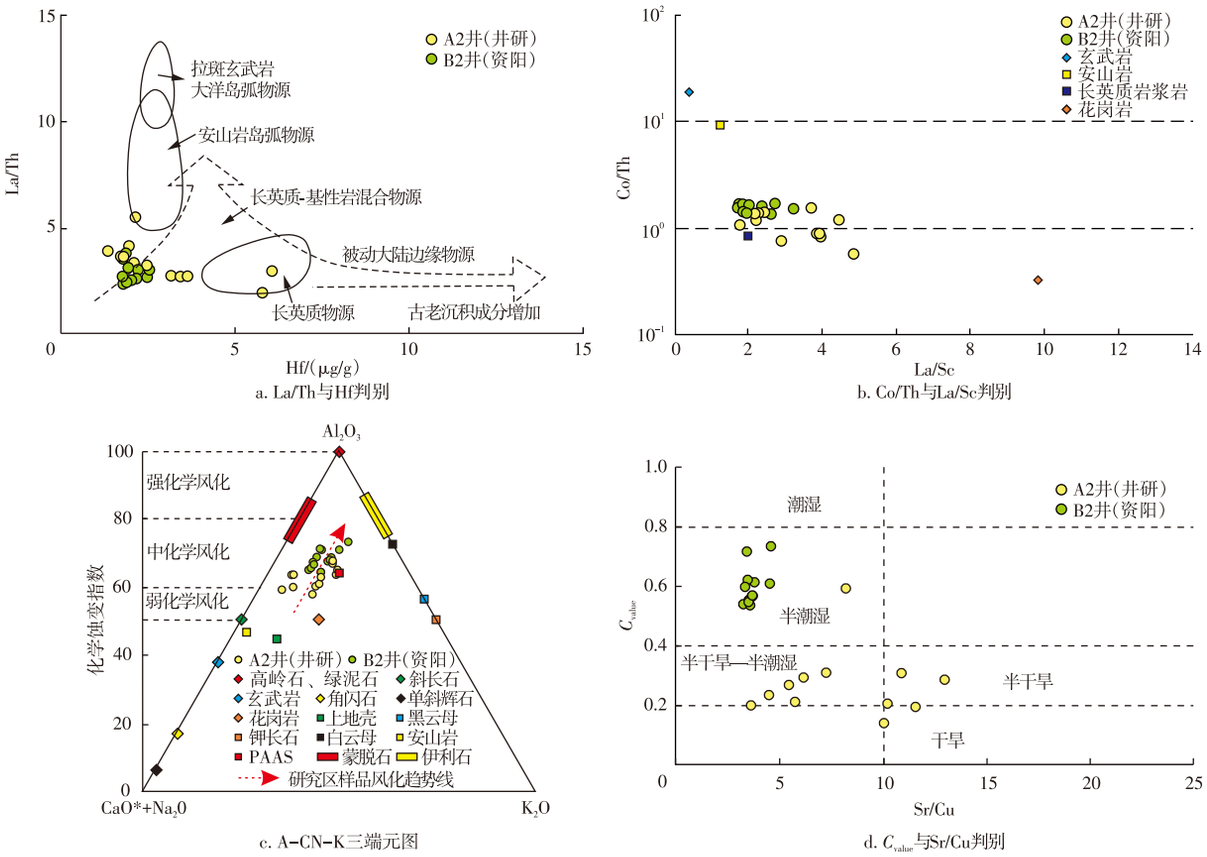
图5　四川盆地井研—资阳地区筇竹寺组海绵骨针及生物碎屑特征

Fig. 5　Characteristics of sponge spicules and bioclasts of Qiongzhusi Formation in Jingyan-Ziyang area, Sichuan Basin

用，为海洋输入更多营养物质，从而提高海洋生产力，并促进有机质的形成与保存[40-41]。基于C_{value}与Sr/Cu值的综合判识，研究区筇竹寺组沉积期古气候区域差异较大。资阳地区C_{value}介于0.54～0.73，平均为0.60，Sr/Cu介于3.28～4.61，平均为3.72，整体表现为半潮湿气候；井研地区C_{value}介于0.14～0.59，平均为0.27，Sr/Cu介于3.64～13.00，平均为8.08，整体以半干旱、半干旱—半潮湿气候为主（图6d）。

4.1.3　热液活动

Al、Ti元素主要富集于陆源碎屑，Fe富集通常与热液活动有关[42]。根据已建立的热液成因判别标准，当岩石的Al/(Al+Fe)<0.4且Fe/Ti>20时，指示其物质来源以纯热液输入为主[43]。本次研究中，井研—资阳地区筇竹寺组页岩样品Al/(Al+Fe)>0.4、Fe/Ti<20（表2）；结合Al-Fe-Mn三角图解分析，绝大多数样品点投点于非热液成因区域（图7a）。由此可以推断，研



注：PAAS为澳大利亚后太古宙平均页岩；CaO*为仅硅酸盐矿物中的CaO；C_{value}为古气候指数。

图6　四川盆地井研—资阳地区筇竹寺组页岩母岩类型及古气候判别(据参考文献[32-33]修改)

Fig. 6　Shale parent rock type and paleoclimate discrimination diagram of Qiongzhusi Formation in Jingyan-Ziyang area, Sichuan Basin (modified according to references [32-33])

究区筇竹寺组页岩在沉积和成岩过程中受热液活动的影响微弱。

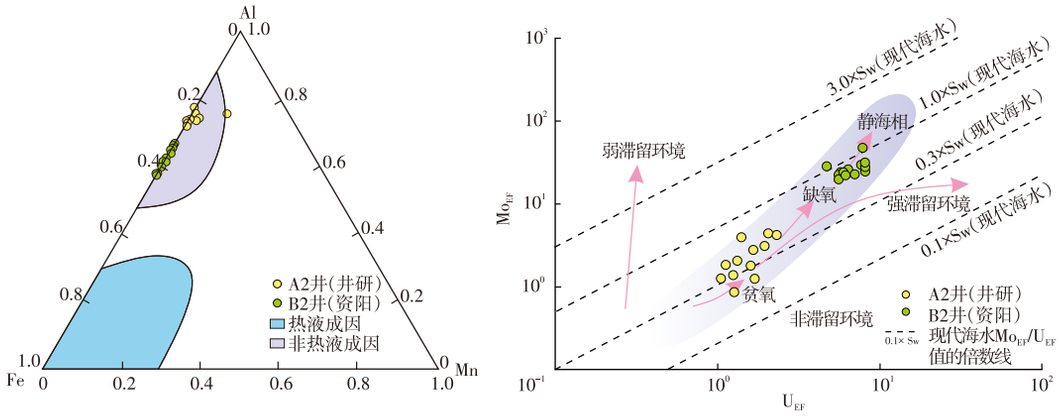
4.1.4　氧化还原条件

Mo、U元素因具有不同的富集和迁移特性，已被广泛用于判断古海洋的氧化还原条件[39]。利用U_{EF}(铀富集系数)与Mo_{EF}(钼富集系数)协变图能够反映底水的氧化还原条件，随着沉积水体还原条件的增强，Mo的富集速率逐渐超过U的富集速率，Mo_{EF}/U_{EF}值逐渐增大[32-33]。实验结果表明研究区整体演化呈现贫氧—缺氧—静海相趋势。A2井U_{EF}介于1.0～2.3、Mo_{EF}介于0.9～4.6，投点于贫氧—缺氧过渡带；B2井U_{EF}介于4.7～8.1、Mo_{EF}介于19.5～47.6，从缺氧带延伸至静海相带(图7b)。

4.1.5　沉积环境对储层品质的影响

井研—资阳地区有机质富集明显受氧化还原条件控制(图8)。筇竹寺组沉积期，上扬子地台经历多期海侵，绵阳—长宁拉张槽内发育深水陆棚沉积，位于槽内中段的资阳地区形成了强滞留闭塞的深水系统，缺氧—静海相底水环境能够有效抑制有机质的氧化，有利于有机质埋藏保存，其TOC含量平均为1.42%。井研地区位于拉张槽中段的西斜坡区，在铁山—威远背斜夹持下形成局部低洼，整体仍属于强滞留闭塞系统，但其水体深度较浅，且处于贫氧—缺氧环境，众多底栖生物形成的生物扰动作用可以使埋藏在沉积物表层的有机质发生再悬浮，极大地破坏了有机质的保存，该区域TOC含量平均仅0.34%。

古气候的区域差异进一步控制了化学风化强度、沉积水体介质性质与早期成岩作用，使得两地储层特征产生分异(图8)。资阳地区在半潮湿气候下，充足的淡水降低了水体盐度，早期碳酸盐胶结作用较弱，原生孔隙受充填程度较低，有利于原生孔隙的保存，储集性能相对较强。井研地区受半干旱、半干旱—半潮湿气候控制，水体蒸发作用较强，导致沉积水体盐度相对偏高，促使早期方解石、白云石等碳酸盐胶结物更为发育，充填原生粒间孔隙，致使储集性较低。同时资阳地区处于强还原缺氧环境，草莓状黄铁矿大量发育，其作为刚性颗粒可构建孔隙支撑格架，保护原生孔隙；而井研地区受贫氧—缺氧过渡环境控制，黄铁矿含量极低(1.14%)，仅见零星自形晶，草莓状黄铁矿不发育(图9)。

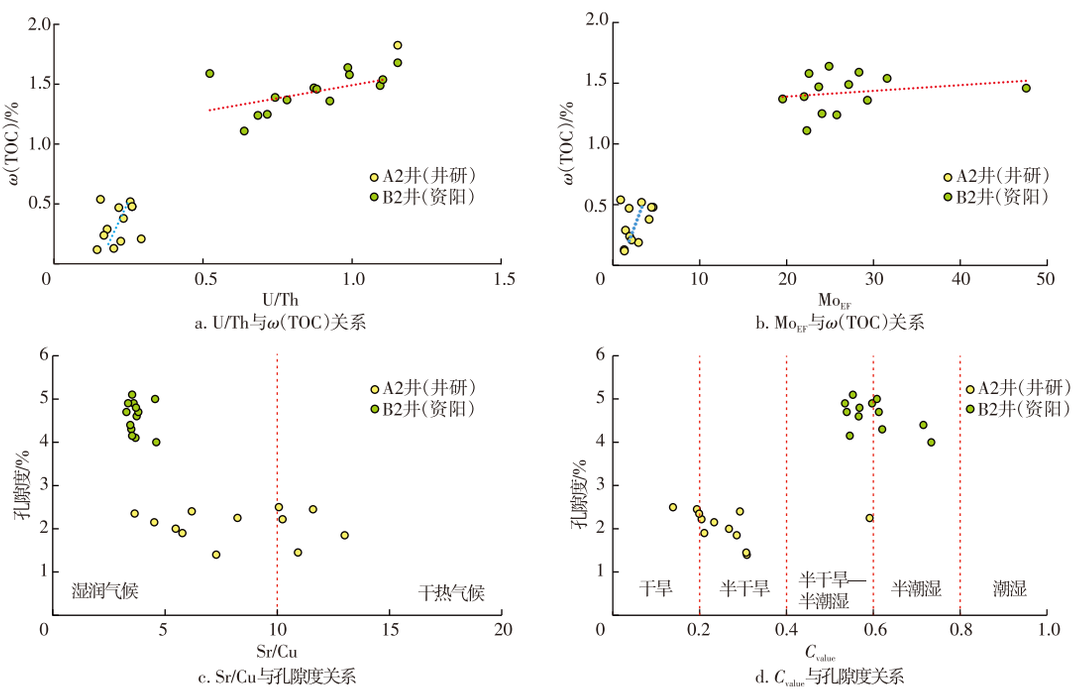


a. Al-Fe-Mn三端元图　　b. U_{EF}与Mo_{EF}协变图

注：U_{EF}为铀富集系数；Mo_{EF}为钼富集系数。

图7　四川盆地井研—资阳地区热液活动及氧化还原条件判别(据参考文献[33,42-43]修改)

Fig. 7　Discrimination diagram of hydrothermal activity and redox conditions in Jingyan-Ziyang area of Sichuan Basin (modified according to references [33,42-43])



a. U/Th与ω(TOC)关系　　b. Mo_{EF}与ω(TOC)关系

c. Sr/Cu与孔隙度关系　　d. C_{value}与孔隙度关系

注：ω(TOC)为总有机碳含量，%。

图8　四川盆地井研—资阳地区筇竹寺组沉积环境对储层品质的影响

Fig. 8　Influence of sedimentary environment on reservoir quality of Qiongzhusi Formation in Jingyan-Ziyang area, Sichuan Basin

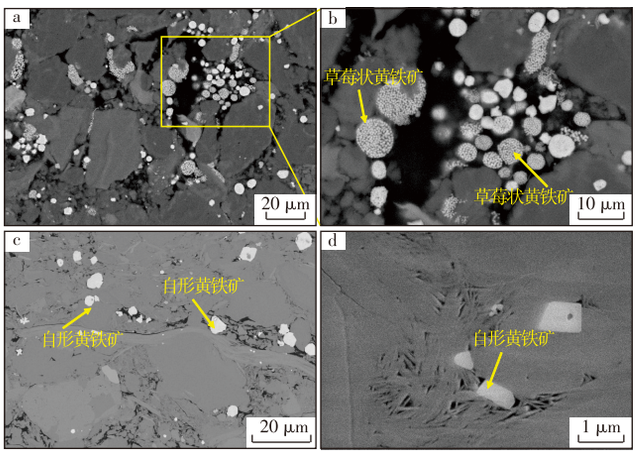
4.2　石英硅质来源

前人研究表明，页岩中石英硅质来源多样，自生石英硅质可源于生物硅质演化、热液输入、黏土矿物转化及压溶作用等途径，但结合区域地质背景与岩石类型差异，石英的硅质来源存在显著分异特征[7-9]。本文通过研究发现，筇竹寺组页岩自生石英存在多个硅质来源，主要为黏土矿物转化与生物演化。

Rb/K_2O值作为判断沉积物来源指标，较高Rb/K_2O值通常反映物源经历了强烈风化；低Rb/K_2O值表明火山碎屑成分贡献更多[44-45]。研究区样品Rb/K_2O值与PAAS相似，指示主要物质来源于上陆壳风化产物(图10)。综上所述，区内火山碎屑(火山玻璃)输入量较低，火山玻璃蚀变对研究区页岩自生石英的形成贡献有限。

长英质矿物的溶蚀作用可为自生石英提供直接硅质来源[46]。据扫描电镜观察发现，研究区碎屑石英颗粒因压溶作用与其他矿物存在线状接触(图4)，但页岩低渗、低孔的特点显著地抑制了SiO_2的迁移[47]，导致自生石英的沉淀过程受限，不太可能成为自生石英的主要硅质来源。

硅质生物(海藻、海绵、放射虫等)是筇竹寺组页岩中



注:a为草莓状黄铁矿大量发育,B1井(资阳),4 513.80 m;b为图9a局部放大照片,草莓状黄铁矿聚集发育,粒间充填有机质;c为自形黄铁矿零星分布,A3井(井研),3 716.44 m;d为自形黄铁矿零星充填于黏土矿物之间,A1井(井研),3 304.11 m。

图9 四川盆地井研—资阳地区筇竹寺组样品黄铁矿特征

Fig. 9 Pyrite characteristics of Qiongzhusi Formation samples in Jingyan-Ziyang area, Sichuan Basin

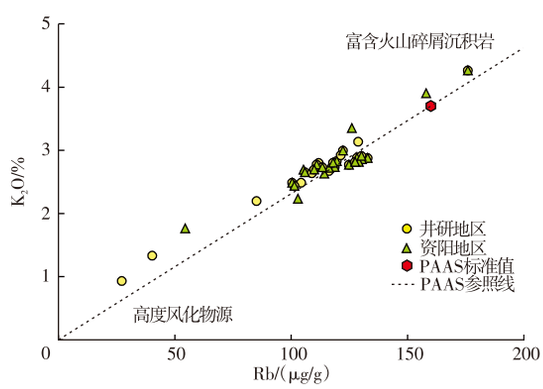


图10 四川盆地井研—资阳地区筇竹寺组页岩K_2O与Rb相关性(据参考文献[45]修改)

Fig. 10 K_2O-Rb correlation of Qiongzhusi Formation shale in Jingyan-Ziyang area, Sichuan Basin (modified according to references [45])

自生石英最主要的硅质来源之一。研究区筇竹寺组整体处于贫氧—缺氧环境(图7b),有利于生物遗骸死亡后的沉降、堆积及原位保存,同时高热演化程度促使生物蛋白石-A转化为生物石英骨架。在成岩过程中,生物石英骨架发生部分溶解并释放硅质,并在孔隙空间充足的条件下,溶解硅沉淀形成微米级微晶石英(图4f);孔隙空间减小至不足以支撑微米级晶体生长时,纳米级微晶石英成为主要的产出形式(图4i)。

S-I(蒙脱石伊利石化)反应作为成岩作用中重要的地球化学反应,过程中释放SiO_2可为自生石英提供硅质来源,反应公式[48]为:

$$\text{Smectite} + K^+ \rightarrow \text{Illite} + SiO_2 + H_2O \quad (3)$$

式中:Smectite为蒙脱石;Iliite为伊利石。

井研—资阳地区筇竹寺页岩R_o(介于2.58%~2.79%,平均2.66%)均高于2.0%(表1),达到S-I反应埋藏温度条件(>60 ℃),同时该区域页岩样品因古气候未发生明显钾交代现象,流体中的K^+主要被用于S-I反应。研究区页岩中S-I成因石英主要以3种形态存在:石英次生加大边、黏土矿物边缘的微晶石英以及与自生黏土矿物伴生的微晶石英(图4a—图4c)。由于S-I反应发生在中成岩阶段,页岩基质孔隙因压实和胶结作用显著减小,因此认为有限的生长空间下与自生黏土矿物伴生的微晶石英源于S-I反应转化而来的SiO_2。

4.3 不同硅质来源石英占比

基于4.2节讨论结果,研究区筇竹寺组页岩石英根据其硅质来源的不同主要可以分为3种类型:①盆外输入的陆源碎屑石英;②硅质生物溶解与再沉淀的生物成因石英(生物碎屑石英、大部分微晶石英和次生加大石英);③蒙脱石向伊利石转化过程中释放SiO_2形成的S-I成因石英(少量的次生加大石英和微晶石英)。

基于元素守恒定律,黏土矿物转化生成的自生石英中硅质与陆源碎屑铝始终保持共生关系,因此Si_{excess}(过量Si)既不包括由黏土矿物转化而来的Si_{S-I},也并非源于热液或火山玻璃蚀变。综上所述,将Si_{excess}归因于生物来源的硅质,并定义为$Si_{biogenic}$(生物硅),不同硅质来源石英的含量可通过以下方程进行定量计算[49]:

$$Si_{excess} = Si_{sample} - [(Si/Al)_{background} \times Al_{sample}] \quad (4)$$

$$SiO_{2_{XX}} = (Si/Al)_{XX}/(Si/Al)_{sample} \quad (5)$$

$$1.308\{[(Al_{3.15}Mg_{0.85})(Si_{8.00})O_{20}(OH)_4(Na_{0.85})2H_2O] + (0.06Fe_2O_3 + 0.56K_2O + 0.02CaO)\} \rightarrow [(Al_{4.12}Fe_{0.1}Mg_{0.56})(Si_{7.17})O_{20}(OH)_4(K_{1.47}Na_{0.01}Ca_{0.03})] + 3.29SiO_2 + 0.56Na_2O + 0.55MgO + 3.23H_2O \quad (6)$$

$$SiO_{2_{terrigenous}} = 1 - SiO_{2_{biogenic}} - SiO_{2_{S-I}} \quad (7)$$

式中:Si_{sample}和Al_{sample}分别为样品中Si和Al的质量分数,%;$(Si/Al)_{background}$为陆源碎屑物质背景中的硅铝比,取值为3.11[50-51];xx代表生物成因和S-I成因;$SiO_{2_{terrigenous}}$为陆源SiO_2的含量,%;$SiO_{2_{biogenic}}$为生物成因SiO_2的含量,%;$SiO_{2_{S-I}}$为蒙脱石伊利石化成因SiO_2的含量,%。

计算结果表明,井研—资阳地区筇竹寺组页岩中不同硅质来源石英平均占比为:陆源碎屑石英81%,生物石英14%,S-I成因石英5%。井研地区页岩中陆源碎屑石英与S-I成因石英平均占比(90%)稍高于资阳地区(81%)。高陆源碎屑石英与S-I成因石英通常指示高陆源输入,表明井研地区相比资阳地区陆源输入程度更强。

4.4　不同硅质来源石英对总有机碳含量的影响

海相页岩中石英含量通常与总有机碳含量呈正相关，但不同硅质来源石英对有机质富集影响不同，五峰组—龙马溪组底部硅质页岩以生物石英为主，与TOC含量呈显著正相关；上部泥质页岩以陆源碎屑石英为主，与TOC含量相关性较弱[52-53]。本文将研究区不同硅质来源石英定量分析结果与总有机碳含量做相关性分析（图11）。

井研—资阳地区页岩TOC含量与陆源碎屑石英含量呈负相关（图11a）。随着陆源碎屑物质输入持续增加，TOC含量逐渐降低，指示高陆源碎屑输入会稀释单位沉积物中有机质，降低沉积物有机质丰度。

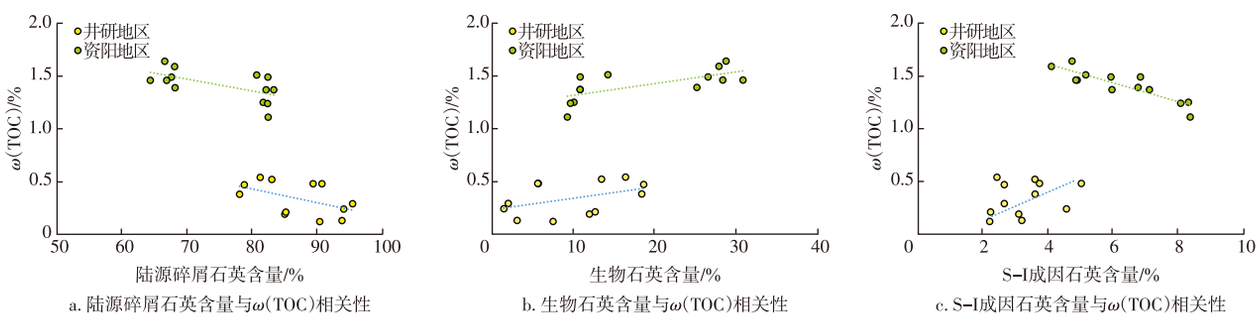
井研—资阳地区页岩TOC含量与生物石英含量呈正相关（图11b）。研究区页岩样品中可见保存良好的生物碎屑和海绵骨针（图5）。海绵动物骨骼主要由海绵骨针组成，其外骨骼或壳体能够对生物体内部有机质形成物理保护，同时生物石英含量与脆性指数呈显著正相关，表明生物石英的发育提高了页岩脆性（图12）。扫描电镜下发现大量微纳米级石英发育于有机质之间（图4f、图4h），证明生物石英伴生的粒间孔隙为有机质提供了赋存的空间。

井研地区页岩TOC含量与S-I成因石英含量呈正相关，资阳地区页岩TOC含量与S-I成因石英含量呈负相关（图11c）。页岩中溶解有机质占总有机质的90%，常以絮凝状存在，在S-I反应过程中析出的硅质会吸附少量有机质，但也会占用有机质的赋存空间[11-13]。黏土矿物较硅质矿物对有机质的吸附亲和力更高，各类黏土矿物中，蒙脱石吸附能力最强[54]。井研地区页岩S-I反应弱，蒙脱石含量相对较高，生成的S-I成因石英占比极低（3%），占用有机质赋存空间少，对有机质的吸附性更强，更有利于有机质富集；资阳地区页岩S-I反应相对较强，蒙脱石含量相对较低，S-I成因石英占比更高（6%），占用空间更多，对有机质的吸附减弱，不利于有机质富集。

4.5　不同硅质来源石英对孔隙的影响

前人研究表明，井研—资阳地区筇竹寺组页岩主要发育以矿物粒间孔隙、无机质集群孔隙为主的无机孔隙[55-56]。不同硅质来源石英对页岩孔隙具有“保护”与“破坏”双重作用，其最终结果主要取决于石英的成因与赋存状态。本文将研究区筇竹寺组页岩氦气孔隙度与不同硅质来源石英及黏土矿物含量做相关性分析（图13）。

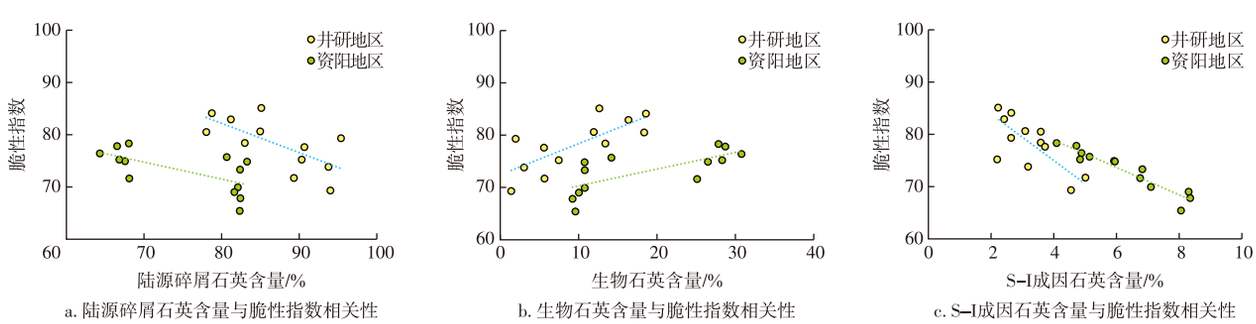
井研—资阳地区页岩中陆源碎屑石英含量与孔隙度呈弱负相关（图13a）。研究区页岩中陆源碎屑石英含量与脆性指数呈负相关（图12a），表明陆源碎屑石英难以对页岩基质起到有效的结构支撑作用，原始粒间孔隙在



a. 陆源碎屑石英含量与ω(TOC)相关性　b. 生物石英含量与ω(TOC)相关性　c. S-I成因石英含量与ω(TOC)相关性

图11　四川盆地井研—资阳地区筇竹寺组不同硅质来源石英含量与TOC含量的相关性

Fig. 11　Correlation characteristics between quartz content and TOC content of different siliceous sources in Qiongzhusi Formation in Jingyan-Ziyang area, Sichuan Basin



a. 陆源碎屑石英含量与脆性指数相关性　b. 生物石英含量与脆性指数相关性　c. S-I成因石英含量与脆性指数相关性

图12　四川盆地井研—资阳地区筇竹寺组不同硅质来源石英含量与脆性指数的相关性

Fig. 12　Correlation characteristics between quartz content from different siliceous sources and BI in Qiongzhusi Formation, Jingyan-Ziyang area, Sichuan Basin

早成岩阶段的压实作用下不断减少。中成岩阶段，陆源碎屑石英在埋藏过程中发生压溶作用，颗粒间由点接触逐渐变为以线、面接触为主，矿物粒间孔进一步减少。同时陆源碎屑石英性质稳定，不易产生溶蚀孔隙，页岩孔隙也不再显著增加。

井研—资阳地区页岩中生物石英含量与孔隙度呈弱正相关(图13b)。早成岩阶段形成的生物石英构成了页岩的刚性颗粒骨架，显著提升了页岩的抗压实能力(图12b)，有效抑制埋藏压实过程中原生孔隙的持续减少。Emmings等[57]研究英国密西西比Bowland页岩发现分散的生物石英具有高流体滞留能力，过量硅含量与含油饱和指数呈显著正相关，结合镜下微观特征证明早期成岩阶段的生物石英抑制了孔隙坍塌。井研—资阳地区筇竹寺组页岩处于高成熟阶段，有机质充填于生物石英伴生粒间孔，内部有机孔发育，共同构成良好的孔隙网络(图14a、图14b)。

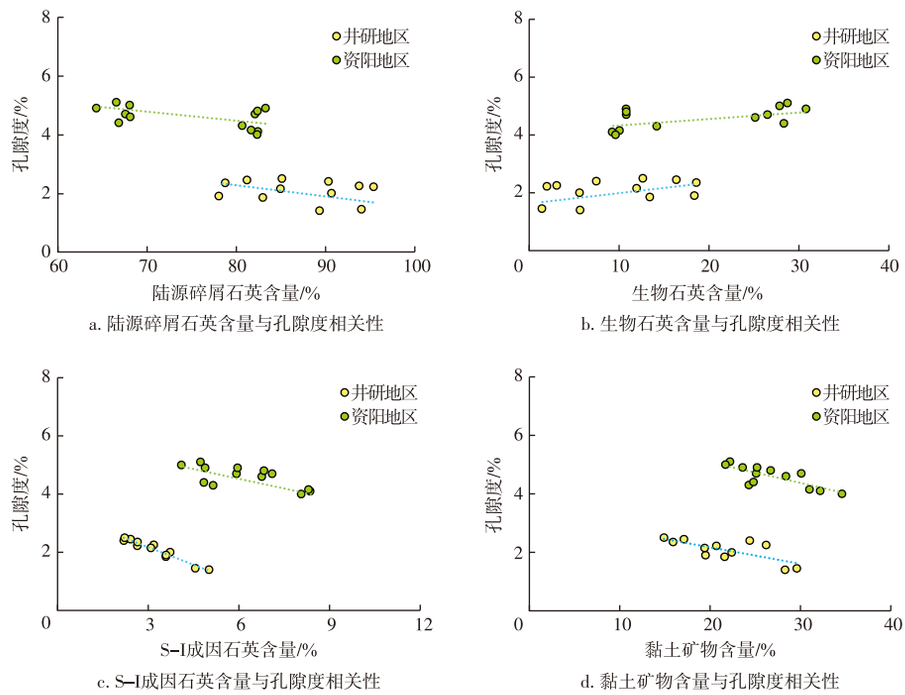
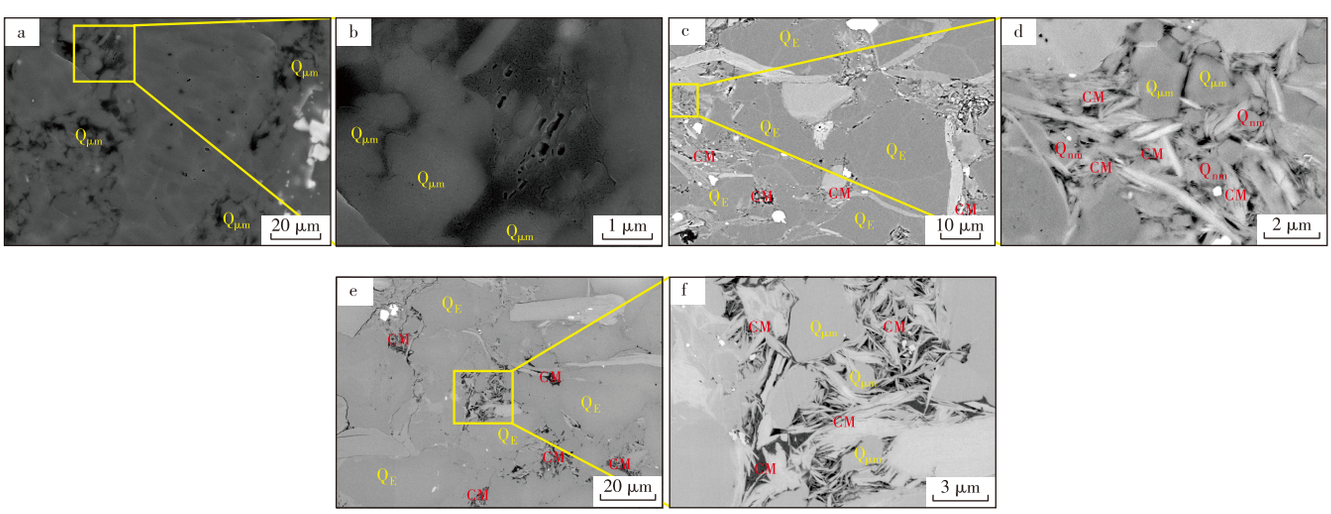


图13　四川盆地井研—资阳地区筇竹寺组不同硅质来源石英及黏土矿物含量与孔隙度的相关性

Fig. 13　Correlation characteristics between quartz and clay mineral content and porosity of different siliceous sources in Qiongzhusi Formation, Jingyan-Ziyang area, Sichuan Basin



注：a为自生石英发育，B3井，4 513.80 m；b为图14a的局部放大照片，微米级自生石英粒间填充有机质并发育有机孔；c为黏土矿物与S-I成因石英发育，B2井，4 625.97 m；d为图14c的局部放大照片，黏土矿物及S-I成因石英填充原生孔隙；e为黏土矿物与S-I成因石英发育，A3井，3 455.86 m；f为图14e的局部放大照片，黏土矿物及S-I成因石英填充原生孔隙；Q_E为陆源碎屑石英；$Q_{\mu m}$为微米级微晶石英；Q_{nm}为纳米级微晶石英；CM为黏土矿物。

图14　四川盆地井研—资阳地区筇竹寺组自生石英对页岩储集空间的影响

Fig. 14　Effect of authigenic quartz on shale reservoir space in Qiongzhusi Formation, Jingyan-Ziyang area, Sichuan Basin

井研—资阳地区页岩中S-I成因石英含量与孔隙度呈显著负相关（图13c）。S-I成因石英源于蒙脱石的伊利石化，黏土矿物自身物理特性会对孔隙产生显著影响[58]。黏土矿物颗粒粒径小、脆性差，早成岩阶段的机械压实作用下易发生塑性变形与定向排列，大量充填于原生矿物粒间孔隙中（图14c—图14f），导致原生粒间孔隙被初步压缩、封堵，孔隙空间大幅缩减。中成岩阶段，蒙脱石向伊利石大量转化形成S-I成因石英填充残余的矿物粒间孔隙与微孔隙，并胶结邻间矿物进一步缩小孔隙空间、堵塞孔隙连通通道（图14d、图14f）。

5　结论

1）研究区筇竹寺组母岩主要来自四川盆地西侧康滇古陆，以长英质岩浆岩为主，混有少量基性岩组分，其沉积与成岩过程受热液活动影响微弱，整体处于稳定的中等化学风化程度。古气候、古海洋水体环境存在区域差异，井研地区以半干旱、半干旱—半潮湿气候为主，水体还原性较弱，资阳地区整体为半潮湿气候，水体还原性较强。沉积古环境差异使得资阳地区筇竹寺组页岩较井研地区有机质更富集、储集性能更优。

2）研究区页岩中石英类型按成因可分为陆源碎屑石英与自生石英（次生加大石英、生物碎屑石英及微晶石英），硅质主要源于陆源输入、生物硅质演化及黏土矿物转化。定量结果表明，陆源输入石英占比最高（81%），其次为生物石英（14%）与S-I成因石英（5%）。井研地区页岩中陆源碎屑石英与S-I成因石英的平均占比（90%）高于资阳地区（81%），指示井研地区陆源输入强度更高。

3）研究区不同成因石英对储层品质的控制作用存在显著差异，生物石英富集段为筇竹寺组页岩气“甜点”段。高陆源碎屑石英会稀释单位沉积物中有机质，降低沉积物有机质丰度，同时其脆性差、易压溶不利于孔隙发育；生物硅质外骨骼及壳体能够对内部有机质具有支撑保护作用，同时生物石英伴生的粒间孔隙能为有机质提供赋存空间，并与内部有机孔共同构成良好的孔隙网络；S-I成因石英形成过程中会吸附少量有机质，但形成后以胶结物形式充填粒间孔隙，占用有机质赋存空间，堵塞渗流通道。井研地区S-I成因石英含量极低，对有机质的保护作用强于破坏作用；资阳地区S-I成因石英含量相对更高，破坏作用更强。

参考文献

[1] 王超, 张柏桥, 舒志国, 等. 四川盆地涪陵地区五峰组—龙马溪组海相页岩岩相类型及储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(3): 485-497.
Wang Chao, Zhang Boqiao, Shu Zhiguo, et al. Lithofacies types and reservoir characteristics of marine shales of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Fuling area, the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(3): 485-497.

[2] 张晨晨, 王玉满, 董大忠, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩脆性评价与"甜点层"预测[J]. 天然气工业, 2016, 36(9): 51-60.
Zhang Chenchen, Wang Yuman, Dong Dazhong, et al. Evaluation of the Wufeng - Longmaxi shale brittleness and prediction of "sweet spot layers" in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(9): 51-60.

[3] 梅俊芳, 梁超, 操应长, 等. 页岩中的石英类型、成因及意义[J]. 古地理学报, 2024, 26(2): 487-501.
Mei Junfang, Liang Chao, Cao Yingchang, et al. Types, genesis and significance of quartz in shales[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2024, 26(2): 487-501.

[4] Xu H, Zhou W, Hu Q H, et al. Quartz types, silica sources and their implications for porosity evolution and rock mechanics in the Paleozoic Longmaxi Formation shale, Sichuan Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 128: 105036.

[5] 马恺, 张兵, 王艳, 等. 四川盆地高峰场地区上二叠统吴家坪组页岩石英成因研究[J]. 矿物岩石, 2022, 42(3): 67-77.
Ma Kai, Zhang Bing, Wang Yan, et al. Study on the genesis of different lithofacies quartz in wujiaping formation shale in Gaofengchang area, Sichuan basin[J]. Mineralogy and Petrology, 2022, 42(3): 67-77.

[6] Dowey P J, Taylor K G. Extensive authigenic quartz overgrowths in the gas-bearing Haynesville-Bossier Shale, USA[J]. Sedimentary Geology, 2017, 356: 15-25.

[7] 闵华军, 张廷山, 李季林, 等. 黑色页岩中微纳米石英成因及其沉积环境指示意义：以上扬子西南缘筇竹寺组黑色页岩为例[J]. 沉积学报, 2025, 43(1): 335-348.
Min Huajun, Zhang Tingshan, Li Jilin, et al. Origin of Micro-nano Quartz in Black Shale and Its Implication for Sedimentary Environment: a case study of the Qiongzhusi Formation in the southwest Upper Yangtze Platform[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2025, 43(1): 335-348.

[8] 谭金萍, 谢小敏, 王张虎, 等. 黔东南麻江羊跳寒武系底部烃源岩SiO2成因及定量分析研究[J]. 地质论评, 2025, 71(1): 137-155.
Tan Jinping, Xie Xiaomin, Wang Zhanghu, et al. Genesis and quantitative analysis of SiO2 in hydrocarbon source rocks at the Cambrian bottom in Majiang, southeastern Guizhou[J]. Geological Review, 2025, 71(1): 137-155.

[9] 郭雯, 董大忠, 李明, 等. 富有机质页岩中石英的成因及对储层品质的指示意义：以四川盆地东南部及周缘龙马溪组龙一1亚段为例[J]. 天然气工业, 2021, 41(2): 65-74.
Guo Wen, Dong Dazhong, Li Ming, et al. Quartz genesis in organic-rich shale and its indicative significance to reservoir quality: a case study on the first submember of the first Member of Lower Silurian Longmaxi Formation in the southeastern Sichuan Basin and its periphery[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(2): 65-74.

[10] Ye Y P, Tang S H, Xi Z D, et al. Quartz types in the Wufeng-Longmaxi Formations in Southern China: implications for porosity evolution and shale brittleness[J]. Marine and Petroleum Geology, 2022, 137: 105479.

[11] 谢小敏, 刘伟新, 张瀛, 等. 四川盆地下古生界硅质页岩层系中硅

质来源及其对有机质保存的影响初探[J]. 地质论评, 2021, 67(2): 429-440.
Xie Xiaomin, Liu Weixin, Zhang Ying, et al. Siliceous source and its influence on organic matter preservation of the two Lower Paleozoic siliceous shale reserviors in Sichuan Basin[J]. Geological Review, 2021, 67(2): 429-440.

[12] 赵建华, 于孟想, 陈扬, 等. 硅质成岩演化过程及其对页岩储层孔隙发育的控制作用: 以四川盆地奥陶系五峰组和志留系龙马溪组为例[J]. 石油学报, 2025, 46(12): 2273-2285.
Zhao Jianhua, Yu Mengxiang, Chen Yang, et al. Silica diagenetic evolution and its control on pore development in shale reservoirs: a case study of the Ordovician Wufeng Formation and Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2025, 46(12): 2273-2285.

[13] 王拔秀, 张鹏辉, 梁杰, 等. 生物成因微晶石英特征及其对海相页岩储层孔隙发育的影响[J]. 沉积学报, 2024, 42(5): 1738-1752.
Wang Baxiu, Zhang Penghui, Liang Jie, et al. Biogenic microcrystalline quartz and its influence on pore development in marine shale reservoirs[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2024, 42(5): 1738-1752.

[14] Dong T, He S, Chen M F, et al. Quartz types and origins in the Paleozoic Wufeng-Longmaxi Formations, Eastern Sichuan Basin, China: implications for porosity preservation in shale reservoirs[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 106: 62-73.

[15] 李凯强. 页岩中石英的成因及意义[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
Li Kaiqiang. The origin and significance of quartz in shales[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.

[16] 郭彤楼, 熊亮, 何建华, 等. 川南下寒武统筇竹寺组新类型页岩气勘探发现及启示[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2024, 46(6): 1-14.
Guo Tonglou, Xiong Liang, He Jianhua, et al. New type shale gas exploration discovery and enlightenment of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the southern Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2024, 46(6): 1-14.

[17] 熊亮, 葛忠伟, 王同, 等. 川南寒武系筇竹寺组勘探潜力研究[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(1): 14-21.
Xiong Liang, Ge Zhongwei, Wang Tong, et al. Exploration potential of Cambrian Qiongzhusi Formation in southern Sichuan Basin[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(1): 14-21.

[18] 杨一茗, 石学文, 刘文平, 等. 四川盆地德阳—安岳裂陷槽中段筇竹寺组沉积演化模式与有利相带优选[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(12): 2106-2120.
Yang Yiming, Shi Xuewen, Liu Wenping, et al. Sedimentary evolution model and favorable facies belt selection of the Qiongzhusi Formation in the middle section of the Deyang-Anyue rift in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2024, 35(12): 2106-2120.

[19] 范海经, 邓虎成, 伏美燕, 等. 四川盆地下寒武统筇竹寺组沉积特征及其对构造的响应[J]. 沉积学报, 2021, 39(4): 1004-1019.
Fan Haijing, Deng Hucheng, Fu Meiyan, et al. Sedimentary characteristics of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the Sichuan Basin and its response to construction[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(4): 1004-1019.

[20] 高山林, 高玉巧, 何贵松, 等. 构造作用对四川盆地页岩气成藏的影响[J]. 地质学报, 2025, 99(12): 4277-4294.
Gao Shanlin, Gao Yuqiao, He Guisong, et al. Tectonic controls on shale gas accumulation in the Sichuan basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2025, 99(12): 4277-4294.

[21] 熊亮, 邓虎成, 吴冬, 等. 四川盆地及其周缘下寒武统筇竹寺组细粒沉积特征与影响因素[J]. 石油实验地质, 2023, 45(5): 857-871.
Xiong Liang, Deng Hucheng, Wu Dong, et al. Fine-grained sedimentary characteristics and influencing factors of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin and on its periphery[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(5): 857-871.

[22] 魏力民, 冯少柯, 顾战宇. 四川盆地中西部筇竹寺组凹槽相区页岩沉积环境及发育模式[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2024, 46(6): 45-60.
Wei Limin, Feng Shaoke, Gu Zhanyu. Shale sedimentary environment and development model in the groove facies area of Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the central and western Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2024, 46(6): 45-60.

[23] 熊亮, 钟怡江, 董翼昕, 等. 川南下寒武统筇竹寺组沉积格局及沉积体系[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2024, 46(6): 15-31.
Xiong Liang, Zhong Yijiang, Dong Yixin, et al. Sedimentary patterns and depositional systems of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the southern Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2024, 46(6): 15-31.

[24] 熊亮, 相泽厚, 伏美燕, 等. 井研及资阳地区筇竹寺组高长英质页岩形成主控因素研究[J]. 石油实验地质, 2026, 48(1): 10-21.
Xiong Liang, Xiang Zehou, Fu Meiyan, et al. Study on main controlling factors of high-felsic shale formation in Qiongzhusi Formation in Jingyan and Ziyang areas[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2026, 48(1): 10-21.

[25] Xu H, Shen J, Yang F, et al. Provenance, sedimentary paleoenvironment and organic matter accumulation mechanisms in shales from the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, SW Yangtze Block, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2025, 181: 107520.

[26] Schoenherr J, Littke R, Urai J L, et al. Polyphase thermal evolution in the Infra-Cambrian Ara Group (South Oman Salt Basin) as deduced by maturity of solid reservoir bitumen[J]. Organic Geochemistry, 2007, 38(8): 1293-1318.

[27] Thyberg B, Jahren J, Winje T, et al. Quartz cementation in Late Cretaceous mudstones, northern North Sea: changes in rock properties due to dissolution of smectite and precipitation of micro-quartz crystals[J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(8): 1752-1764.

[28] Peng J W, Milliken K L, Fu Q L. Quartz types in the Upper Pennsylvanian organic-rich Cline Shale (Wolfcamp D), Midland Basin, Texas: implications for silica diagenesis, porosity evolution and rock mechanical properties[J]. Sedimentology, 2020, 67(4): 2040-2064.

[29] Williams L A, Parks G A, Crerar D A. Silica diagenesis; I, solubility controls[J]. Journal of Sedimentary Research, 1985, 55(3): 301-311.

[30] 吴冬, 邓虎成, 熊亮, 等. 四川盆地及其周缘下寒武统麦地坪组—筇竹寺组层序充填和演化模式[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44

(3): 764-777.
Wu Dong, Deng Hucheng, Xiong Liang, et al. Sequence filling and evolutionary model of the Lower Cambrian Maidiping-Qiongzhusi formations in Sichuan Basin and on its periphery[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 764-777.

[31] 徐守成, 高博乐, 丁蔚楠, 等. 超深层礁下滩薄储层沉积模式与预测: 以元坝西区长兴组礁下滩储层为例[J]. 石油物探, 2025, 64(3): 442-454.
Xu Shoucheng, Ga Bole, Ding Weinan, et al. Sedimentary model and prediction of ultra-deep thin reef beach reservoirs: a case study of reef beach reservoir of Changxing Formation in Yuanba West District [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2025, 64(3): 442-454.

[32] 杨永祯, 郭岭, 方泽鑫, 等. 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, 2024, 42(1): 324-341.
Yang Yongzhen, Guo Ling, Fang Zexin, et al. 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, 2024, 42(1): 324-341.

[33] 彭军, 田景春, 伊海生, 等. 扬子板块东南大陆边缘晚前寒武纪热水沉积作用[J]. 沉积学报, 2000, 18(1): 107-113.
Peng Jun, Tian Jingchun, Yi Haisheng, et al. The late Precambrian hot water sedimentation of the southeast Yangtze plate continental margin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(1): 107-113.

[34] 段明新, 周传芳, 杨华本, 等. 漠河盆地西部二十二站组碎屑锆石U-Pb年龄、地球化学特征及其物源意义[J]. 地质学报, 2021, 95(11): 3317-3334.
Duan Mingxin, Zhou Chuanfang, Yang Huaben, et al. Detrital zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of the Ershi′erzhan Formation in western Mohe basin and its provenance significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(11): 3317-3334.

[35] 邓倩, 廖泽文, 徐建兵, 等. 古海洋微量元素地球化学演化: 对关键地质事件研究的启发[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2019, 38(3): 587-594.
Deng Qian, Liao Zewen, Xu Jianbing, et al. Geochemical recycling of trace elements in paleo-oceans: implications to the studies associated with key geological events[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2019, 38(3): 587-594.

[36] 刘金, 王剑, 谭静强, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组沉积古环境与有机质富集[J]. 地质力学学报, 2023, 29(5): 631-647.
Liu Jin, Wang Jian, Tan Jingqiang, et al. Sedimentary paleo-environment and organic matter enrichment in the Lucaogou Formation of the Jimsar Sag[J]. Journal of Geomechanics, 2023, 29(5): 631-647.

[37] 李映艳, 邓远, 何吉祥, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油有效储层物性下限研究[J]. 断块油气田, 2025, 32(1): 20-26.
Li Yingyan, Deng Yuan, He Jixiang, et al. Study on lower limit of physical properties of effective shale oil reservoirs of Lucaogou Formation, Jimsar Sag[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2025, 32(1): 20-26.

[38] 唐勇, 郑孟林, 王霞田, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组烃源岩沉积古环境[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(5): 677-692.
Tang Yong, Zheng Menglin, Wang Xiatian, et al. Sedimentary paleoenvironment of source rocks of Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(5): 677-692.

[39] Herron M M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data[J]. Journal of Sedimentary Research, 1988, 58(5): 820-829.

[40] 熊亮, 董晓霞, 魏力民, 等. 川西南井研—犍为地区筇竹寺组沉积古环境与有机质富集机制[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(12): 2091-2105.
Xiong Liang, Dong Xiaoxia, Wei Limin, et al. Sedimentary paleoenvironment and organic matter enrichment mechanism of the Qiongzhusi Formation in Jingyan-Qianwei area, Southwest Sichuan [J]. Natural Gas Geoscience, 2024, 35(12): 2091-2105.

[41] 耶祥瑞, 宋文礼, 宋立忠, 等. 川西南福集向斜五峰组—龙马溪组页岩层理及物性耦合性[J]. 断块油气田,2025,32(4):614-624.
Ye Xiangrui, Song Wenli, Song Lizhong, et al. Shale bedding and physical property coupling of Wufeng-Longmaxi Formation in Fuji syncline, southwest Sichuan[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2025, 32(4): 614-624.

[42] Boström K, Kraemer T, Gartner S. Provenance and accumulation rates of opaline silica, Al, Ti, Fe, Mn, Cu, Ni and Co in Pacific pelagic sediments[J]. Chemical Geology, 1973, 11(2): 123-148.

[43] Yamamoto K. Geochemical characteristics and depositional environments of cherts and associated rocks in the Franciscan and Shimanto Terranes[J]. Sedimentary Geology, 1987, 52(1/2): 65-108. [LinkOut]

[44] Su W B, Huff W D, Ettensohn F R, et al. K-bentonite, black-shale and flysch successions at the Ordovician - Silurian transition, South China: possible sedimentary responses to the accretion of Cathaysia to the Yangtze Block and its implications for the evolution of Gondwana[J]. Gondwana Research, 2009, 15(1): 111-130.

[45] McLennan S M, Taylor S R, McCulloch M T, et al. Geochemical and Nd - Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: crustal evolution and plate tectonic associations[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1990, 54(7): 2015-2050.

[46] 刘金库, 彭军, 石岩, 等. 致密砂岩储层石英溶蚀成因及对孔隙发育的影响: 以川中—川南过渡带须家河组为例[J]. 石油学报, 2015, 36(9): 1090-1097.
Liu Jinku, Peng Jun, Shi Yan, et al. The genesis of quartz dissolution in tight sand reservoirs and its impact on pore development: a case study of Xujiahe Formation in the transitional zone of Central-Southern Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(9): 1090-1097.

[47] Tribovillard N, Algeo T J, Lyons T, et al. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update[J]. Chemical Geology, 2006, 232(1/2): 12-32.

[48] Hower J, Eslinger E V, Hower M E, et al. Mechanism of burial metamorphism of argillaceous sediment: 1. Mineralogical and chemical evidence[J]. Geological Society of America Bulletin, 1976, 87(5): 725.

[49] Niu X, Yan D T, Zhuang X G, et al. Origin of quartz in the Lower Cambrian Niutitang Formation in south Hubei Province, Upper Yangtze platform[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 96:

271-287.

[50] Wedepohl K H. Environmental influences on the chemical composition of shales and clays[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 1971, 8: 307-333.

[51] Schultze-Lam S, Ferris F G, Konhauser K O, et al. In situ silicification of an Icelandic hot spring microbial mat: implications for microfossil formation[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1995, 32(12): 2021-2026.

[52] Jin Z J, Nie H K, Liu Q Y, et al. Source and seal coupling mechanism for shale gas enrichment in Middle Ordovician Wufeng Formation - Lower Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its periphery[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 97: 78-93.

[53] 王淑芳, 邹才能, 董大忠, 等. 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[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2014, 50(3): 476-486.
Wang Shufang, Zou Caineng, Dong Dazhong, et al. Biogenic silica of organic-rich shale in Sichuan Basin and its significance for shale gas [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2014, 50 (3): 476-486.

[54] Zhao T X, Xu S, Hao F. Differential adsorption of clay minerals: implications for organic matter enrichment[J]. Earth-Science Reviews, 2023, 246: 104598.

[55] 周桦, 董晓霞, 魏力民, 等. 井研—犍为地区筇竹寺组粉砂质页岩储层特征[J]. 天然气技术与经济, 2023, 17(2): 23-31.
Zhou Hua, Dong Xiaoxia, Wei Limin, et al. Characteristics on silty shale reservoirs of Qiongzhusi Formation, Jingyan-Qianwei area[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2023, 17(2): 23-31.

[56] 何骁, 郑马嘉, 刘勇, 等. 四川盆地"槽-隆"控制下的寒武系筇竹寺组页岩储层特征及其差异性成因[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 420-439.
He Xiao, Zheng Majia, Liu Yong, et al. Characteristics and differential origin of Qiongzhusi Formation shale reservoirs under the"aulacogen-uplift"tectonic setting, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 420-439.

[57] Emmings J F, Dowey P J, Taylor K G, et al. Origin and implications of early diagenetic quartz in the Mississippian Bowland Shale Formation, Craven Basin, UK[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 120: 104567.

[58] 王淑芳, 张子亚, 董大忠, 等. 四川盆地下寒武统筇竹寺组页岩孔隙特征及物性变差机制探讨[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(9): 1619-1628.
Wang Shufang, Zhang Ziya, Dong Dazhong, et al. Microscopic pore structure and reasons making reservoir property weaker of Lower Cambrian Qiongzhusi shale, Sichuan Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(9): 1619-1628.

(编辑 李青)