

引用本文: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.
DOI:10.11781/sysydz202305857.
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. DOI: 10.11781/sysydz202305857

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

熊亮¹, 邓虎成^{2,3}, 吴冬³, 魏力民⁴, 王同⁴,
周桦⁴, 曹凯旋³, 解馨慧⁵, 马若龙³, 钟雨菊³

1. 中国石化西南油气分公司, 成都 610041;
2. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059;
3. 成都理工大学能源学院, 成都 610059;
4. 中国石化西南油气分公司勘探开发研究院, 成都 610041;
5. 成都理工大学地球物理学院, 成都 610059

摘要:四川盆地及其周缘下寒武统筇竹寺组页岩气资源丰富,已成为盆地重要的页岩气开发层段之一。受控于复杂的沉积格局,该区筇竹寺组粉砂质页岩纵向储层的岩相多样,非均质性强,制约了页岩气勘探和开发,因此亟需对其沉积特征、沉积相带和沉积模式开展研究。基于前期构造、层序地层研究认识,通过对矿物岩石、钻测井、地球化学和古生物等主要资料开展精细分析,明确四川盆地及其周缘早寒武世为海洋—古陆联合影响、水体深度中等、还原作用普遍发生的沉积背景,认为筇竹寺组主要沉积于滨岸相和陆棚相,并以陆棚相为主体,包括浅水陆棚亚相和深水陆棚亚相。通过对波浪和潮汐联合作用、海水蒸发作用、悬浮作用、上升洋流以及沉积古地貌等细粒沉积影响因素开展分析,结合沉积物空间分布特征,建立了四川盆地及其周缘筇竹寺组细粒岩沉积模式,即沉积初期差异沉降作用显著,层序厚度变化大,不同地区沉积特征及影响因素差异较大;沉积中期差异沉降作用不断减弱,层序厚度差异持续减小;沉积末期稳定沉降,进入“广盆”阶段,层序厚度趋于一致。

关键词:细粒沉积;沉积模式;沉积环境;筇竹寺组;下寒武统;四川盆地

中图分类号:TE122.23

文献标识码:A

DOI:10.11781/sysydz202305857

Fine-grained sedimentary characteristics and influencing factors of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin and on its periphery

XIONG Liang¹, DENG Hucheng^{2,3}, WU Dong³, WEI Limin⁴, WANG Tong⁴,
ZHOU Hua⁴, CAO Kaixuan³, XIE Xinhui⁵, MA Ruolong³, ZHONG Yutao³

1. SINOPEC Southwest Oil & Gas Company, Chengdu, Sichuan 610041, China;
2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, (Chengdu University of Technology), Chengdu, Sichuan 610059, China;
3. College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;
4. Research Institute of Exploration and Development, SINOPEC Southwest Oil & Gas Company, Chengdu, Sichuan 610041, China;
5. College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China

Abstract: The Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin and on its periphery is rich in shale gas resources, and it has become one of the important shale gas development intervals in Sichuan Basin. Controlled by complex sedimentary setting, the silty shale reservoir in Qiongzhusi Formation has various lithofacies and strong

收稿日期(Received):2023-07-07;修订日期(Revised):2023-08-21;出版日期(Published):2023-09-28。

作者简介:熊亮(1975—),男,硕士,研究员,从事非常规油气勘探及生产管理等工作。E-mail:xiangliang.xnyq@sinopec.com。

通信作者:邓虎成(1980—),男,博士,教授,从事油气开发等工作。E-mail:denghucheng@cdu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(42072182)和中国石化西南油气分公司科研项目(KJ-765-2329,KJ-766-2330,KJ-767-2331)联合资助。

© Editorial Office of Petroleum Geology & Experiment. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

heterogeneity longitudinally, which restricts the exploration and development of shale gas. Therefore, it is urgent to study the sedimentary characteristics, sedimentary facies and sedimentary models. Based on the previous understanding of tectonic setting and sequence stratigraphy, and through detailed analysis of rock data, well logging data, geochemistry data and paleontology data, this paper clarifies the Early Cambrian sedimentary background of combined ocean-paleoland influence, moderate water depth and widespread reduction of Sichuan Basin and its periphery. The paper also believes that the Qiongzhusi Formation is mainly deposited in shore facies and continental shelf facies. The continental shelf facies are dominated, including shallow water continental shelf sub-facies and deep water continental shelf sub-facies. Based on the analysis of the combined action of wave and tide, seawater evaporation, suspension, rising ocean current, sedimentary paleogeomorphology and other fine-grained sedimentary influencing factors, and combined with the spatial distribution characteristics of sediments, the fine-grained sedimentary model of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin and on its periphery is established, i.e., in the early stage of sedimentation, the effect of differential sedimentation is significant, the sequence thickness varies greatly, and the sedimentary characteristics and influencing factors differ greatly in different regions. In the middle stage of sedimentation, the effect of differential sedimentation is diminished and the difference of sequence thickness decreases continuously. In the late stage of sedimentation, with steady sedimentation, it enters the "open basin" stage, and the sequence thickness tends to be consistent.

Key words: fine-grained sedimentation; sedimentary model; sedimentary environment; Qiongzhusi Formation; Lower Cambrian; Sichuan Basin

页岩油气勘探开发实践表明,页岩油气是我国油气发展的重要战略接替资源^[1-4]。随着页岩油气资源勘探开发的日益深入,页岩等细粒沉积岩的沉积环境和沉积相研究显得尤为重要,细粒沉积岩主要形成于陆相湖盆和海相陆棚环境^[5-7]。目前对海相陆棚沉积环境和沉积相带的总体认识较为明确^[8-11],但不同沉积环境和相带的沉积物特征、沉积动力和影响因素等仍需深入研究。中国石化与中国石油近期勘探实践表明,四川盆地及其周缘下寒武统筇竹寺组海相页岩和粉砂质页岩具有巨大的天然气勘探开发潜力^[12]。前期研究揭示,筇竹寺组页岩和粉砂质页岩在研究区广泛分布,受控于复杂的沉积格局和沉积背景,储层的岩相多样、非均质性强,因此,必须加强对沉积环境、沉积分异和沉积相带的研究。前人将筇竹寺组划分为 3 个三级层序,并建立了层序地层充填和分布模型^[13];将沉积相划分为滨岸、陆棚、潮坪、浅水缓斜坡等^[8-9,14-15]。本文在充分调研的基础上,利用研究区 40 余口重点钻井、9 条野外露头剖面、458 m 岩心和 350 余件分析测试资料,对筇竹寺组底部、中部和顶部层序开展岩石学、储层地质学、地球化学和古生物学分析,进而对筇竹寺组细粒岩开展沉积背景、沉积特征、沉积相带和影响因素研究,在明确不同类型沉积物发育和分布特征的基础上,探讨了沉积动力机制和影响因素分布规律,以期为该组筇竹寺组页岩和粉砂质页岩气的勘探开发提供理论

支持。

1 区域地质概况

四川盆地隶属于扬子板块,面积约 18×10^4 km²,是经过多旋回构造运动形成的大型叠合盆地^[16],从古生代到新生代,主要经历了持续拉张作用、裂谷作用、逆冲推覆作用、剪切和块断作用^[17]。四川盆地于晚震旦世到早寒武世间,在罗迪尼亚超大陆裂解以及冈瓦纳大陆聚合的影响下,形成了以拉张为主、弱挤压为辅的构造演化模式^[18-19]。受桐湾运动和兴凯地裂运动共同作用影响,四川盆地形成了凹凸相间的构造地貌^[20]。

四川盆地地下寒武统筇竹寺组底部岩性为灰黑色泥页岩,中上部为黄灰色泥质粉砂岩、粉砂岩至细砂岩。筇竹寺组与下伏灯影组白云岩或是麦地坪组含磷地层呈不整合接触,与上覆沧浪铺组紫红色砂质泥岩、泥质粉砂岩呈整合接触^[21];地层基本位于 5 000 m 以下的深度,向边缘埋藏深度变浅,在四川盆地的北部、东北部、东南边缘均有出露^[14]。

受古地理构造分异的影响,下寒武统沉积厚度及沉积相在不同区域具有差异(图 1)。在早寒武世,上扬子地区的海水自东南方向快速侵入,海平面迅速上升,沉积中心为大面积的缺氧深水陆棚环境,发育自下而上粒度变粗的碎屑岩沉积构造;随后海平面缓慢降低,沉积水体整体由深变浅,自南向北发育深水陆棚—浅水陆棚—滨岸相沉积序列^[14,22]。

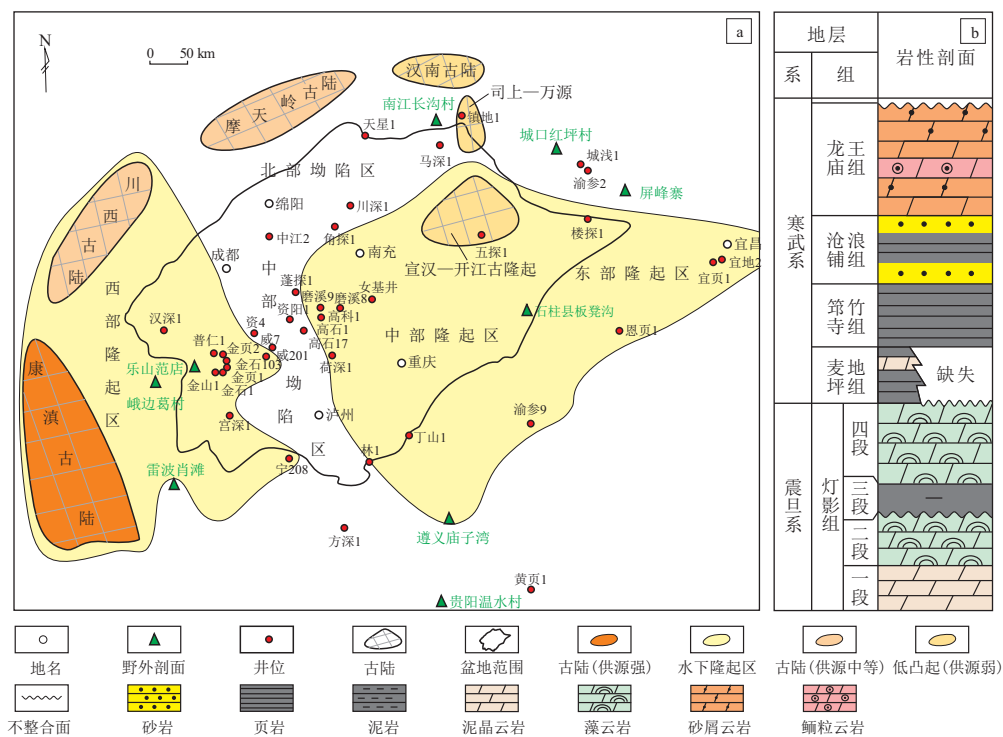


图1 四川盆地及其周缘早寒武世构造—沉积分区(a)及地层综合柱状图(b)
据参考文献[13]修改。

Fig.1 Tectono-sedimentary compartmentalization (a) and composite stratigraphic column (b) of Early Cambrian in Sichuan Basin and on its periphery

2 早寒武世沉积背景和物源分布

2.1 沉积背景

主要通过构造—沉积演化阶段、层序发育模式、地球化学微量元素特征等资料开展综合分析,认为四川盆地及其周缘筇竹寺组形成于陆棚环境,受海洋—古陆的双重影响,水体深度中等,还原作用普遍发生。

2.1.1 由深变浅的水体

沉积古地貌和岩性变化均可以有效揭示沉积水深。四川盆地筇竹寺组沉积期古地貌揭示了中央拉张槽(中部拗陷区)的存在^[23],槽内沉积水体深度更大,西部并研—犍为地区、威远地区、中东部合川—重庆地区、宜昌地区沉积古地貌相对较高(图1),沉积水体相对更浅,往北至南江地区、东南遵义—铜仁地区水体深度显著增大。筇竹寺组底部层序以泥岩为主,中部层序发育砂泥混合沉积物,顶部层序广泛发育砂岩,从岩性变化角度反映了沉积水体由深变浅。

2.1.2 缺氧、贫氧的环境

$V/(V+Ni)$ 值广泛运用于古水体氧化还原环境的判别中,一般来说, $V/(V+Ni)$ 值大于 0.57 时,可以认为沉积水体总体处于缺氧环境; $V/(V+Ni)$

值小于 0.46 时,则认为沉积水体总体处于氧化环境^[24-26]。本文选取的样品分布于四川盆地及其周缘不同区域,具有一定的广泛性,不同井不同层段的 $V/(V+Ni)$ 值基本都在 0.60 以上^[14](表 1),揭示筇竹寺组总体沉积于贫氧—缺氧的环境^[25]。纵向上,沉积水体还原性往上趋于减弱,指示了闭塞—开阔的沉积环境变迁;横向上,往研究区东南方向, $V/(V+Ni)$ 值略有增大,显示了还原作用的增强^[14]。

2.1.3 由湿转旱的古气候

沉积物中喜干型微量元素 Sr 与喜湿型微量元素 Cu 的比值,对古气候具有灵敏的指示^[27]。Sr/Cu 值大于 5.0 表明干旱、炎热的古气候,分布于 1.3~5.0 表明温暖、潮湿的古气候。研究区筇竹寺组沉积期总体为干旱—潮湿交替的气候^[14],自下往上,Sr/Cu 值逐渐增大,反映了古气候逐渐变干旱的趋势(表 1)。

2.2 物源分布

四川盆地及其周缘存在多个古陆,主要分布在北部和西部(图 1)。目前来看,西部康滇古陆供源显著,对研究区影响最大;摩天岭古陆影响次之;北部汉南古陆、宣汉—开江古隆起和司上一万源古隆起的影响较弱^[13]。受碎屑物质差异搬运和沉积的

表 1 四川盆地金石 103 井下寒武统筇竹寺组古沉积环境特征参数
Table 1 Characteristic parameters of palaeosedimentary environment
of Lower Cambrian Qiongzhusi Formation of well Jinshi 103, Sichuan Basin

小层	深度/m	V/10 ⁻⁶	Ni/10 ⁻⁶	Cu/10 ⁻⁶	Sr/10 ⁻⁶	V/(V+Ni)	Sr/Cu
⑩	3 311.28	180.293	55.297	17.549	116.256	0.77	6.62
⑩	3 315.52	210.778	55.958	31.345	107.639	0.79	3.43
⑨	3 318.41	208.376	53.080	21.578	107.465	0.80	4.98
⑧	3 319.94	115.484	39.144	14.123	102.772	0.75	7.28
⑧	3 323.07	99.285	30.944	7.744	100.677	0.76	13.00
⑧	3 325.99	95.073	28.141	7.601	105.979	0.77	13.94
⑧	3 328.90	100.586	29.846	9.874	103.631	0.77	10.50
⑧	3 331.23	116.127	35.442	14.208	105.087	0.77	7.40
⑧	3 334.07	118.749	37.268	16.940	111.147	0.76	6.56
⑧	3 335.33	54.843	15.657	0.978	268.689	0.78	274.73
⑧	3 335.78	87.297	33.195	10.695	120.504	0.72	11.27
⑧	3 338.01	95.264	45.662	8.576	115.595	0.68	13.48
⑧	3 340.51	66.339	31.094	8.292	115.888	0.68	13.98
⑧	3 343.66	77.381	25.393	16.091	124.225	0.75	7.72
⑧	3 347.23	86.371	31.834	18.969	112.161	0.73	5.91
⑦	3 350.79	77.195	30.035	16.456	90.101	0.72	5.48
⑦	3 353.98	82.511	25.800	11.766	96.746	0.76	8.22
⑦	3 356.91	83.564	26.924	17.329	97.351	0.76	5.62
⑦	3 358.88	112.316	36.080	10.068	101.996	0.76	10.13
⑦	3 361.03	83.078	28.532	9.385	90.710	0.74	9.67
⑦	3 363.51	73.694	21.072	16.024	99.154	0.78	6.19
⑦	3 366.07	82.574	24.828	20.081	98.036	0.77	4.88
⑦	3 368.06	80.668	19.907	9.763	108.221	0.80	11.08
⑦	3 371.64	42.354	14.082	13.257	135.664	0.75	10.23
⑦	3 371.93	28.204	6.191	7.040	633.781	0.82	90.03
⑦	3 375.55	65.363	21.404	11.128	98.299	0.75	8.83
⑦	3 380.17	54.001	18.172	10.274	109.910	0.75	10.70
⑦	3 381.24	35.768	10.501	9.238	260.266	0.77	28.17
⑦	3 382.12	72.238	21.454	8.459	98.015	0.77	11.59
⑦	3 384.78	52.836	16.622	11.955	130.520	0.76	10.92
⑦	3 386.76	57.358	18.925	14.382	118.872	0.75	8.27
⑥	3 387.43	74.626	22.609	18.000	112.244	0.77	6.24
⑥	3 389.99	42.945	15.504	22.558	144.806	0.73	6.42
⑥	3 393.06	75.975	26.994	18.380	106.818	0.74	5.81
⑥	3 395.01	73.371	27.334	24.749	114.175	0.73	4.61
⑥	3 396.47	78.329	29.942	25.627	115.300	0.72	4.50
⑥	3 399.60	62.603	24.005	24.784	122.893	0.72	4.96
⑥	3 401.72	36.382	12.630	14.342	418.348	0.74	29.17
⑥	3 402.11	78.028	30.731	26.748	110.617	0.72	4.14
⑥	3 405.30	71.137	27.759	29.608	126.599	0.72	4.28
⑥	3 407.76	70.669	27.384	26.816	123.850	0.72	4.62
⑥	3 410.42	82.292	33.020	24.367	118.619	0.71	4.87
⑥	3 413.61	80.841	33.055	25.457	111.132	0.71	4.37
⑥	3 415.99	56.943	22.008	20.749	81.005	0.72	3.90
⑥	3 418.49	58.751	21.244	20.129	140.282	0.73	6.97
⑥	3 420.97	55.366	19.509	19.378	465.100	0.74	24.00
⑥	3 423.70	72.458	27.837	29.814	127.499	0.72	4.28
⑤	3 424.97	86.498	32.863	28.169	123.178	0.72	4.37
④	3 425.35	57.187	23.740	23.136	135.665	0.71	5.86
④	3 425.85	28.551	11.217	16.613	193.505	0.72	11.65
④	3 427.62	57.776	22.570	22.544	130.102	0.72	5.77
④	3 431.17	52.846	19.470	26.750	130.842	0.73	4.89
④	3 434.30	82.680	28.266	30.390	137.213	0.75	4.52
④	3 436.49	73.621	25.011	33.137	134.850	0.75	4.07
④	3 439.33	46.104	15.780	20.280	452.599	0.75	22.32
④	3 442.17	64.535	23.825	31.711	146.865	0.73	4.63
④	3 444.55	49.354	17.338	29.056	292.644	0.74	10.07
④	3 448.71	69.603	28.005	28.975	131.115	0.71	4.53
④	3 452.26	61.793	25.784	44.558	175.310	0.71	3.93

续表 1
Table 1 (continued)

小层	深度/m	V/ 10^{-6}	Ni/ 10^{-6}	Cu/ 10^{-6}	Sr/ 10^{-6}	V/(V+Ni)	Sr/Cu
④	3 454.93	48.091	18.449	34.470	744.439	0.72	21.60
④	3 456.89	40.980	14.861	43.586	552.092	0.73	12.67
④	3 458.65	40.503	14.203	31.974	811.738	0.74	25.39
④	3 460.42	77.353	31.188	31.760	129.324	0.71	4.07
④	3 464.38	57.627	24.352	35.870	134.986	0.70	3.76
④	3 468.07	59.947	23.919	35.570	599.082	0.71	16.84
④	3 469.67	63.507	25.168	29.315	613.789	0.72	20.94
③	3 472.52	68.071	28.793	34.142	123.033	0.70	3.60
③	3 475.59	49.295	19.883	44.946	626.026	0.71	13.93
③	3 477.22	46.551	17.592	53.001	746.369	0.73	14.08
③	3 479.44	58.968	25.137	48.741	535.179	0.70	10.98
③	3 481.71	76.540	32.351	40.683	123.124	0.70	3.03
③	3 484.74	84.534	32.336	31.005	132.385	0.72	4.27
③	3 487.60	48.759	18.901	13.706	477.886	0.72	34.87
③	3 491.80	77.063	30.578	24.066	133.348	0.72	5.54
③	3 493.59	53.007	21.856	17.319	412.855	0.71	23.84
③	3 498.82	54.744	19.630	24.153	118.781	0.74	4.92
③	3 500.59	90.144	35.181	21.086	111.186	0.72	5.27
③	3 503.69	67.087	22.012	26.264	115.028	0.75	4.38
③	3 506.65	75.234	25.176	16.946	143.367	0.75	8.46
③	3 508.14	76.857	28.337	19.070	109.465	0.73	5.74
③	3 510.80	40.923	15.036	7.462	496.879	0.73	66.59
③	3 511.99	53.556	23.779	14.225	348.273	0.69	24.48
③	3 513.36	78.059	28.153	21.031	98.588	0.73	4.69
③	3 515.78	53.208	20.328	10.992	335.272	0.72	30.50
③	3 517.93	47.835	19.571	10.860	360.657	0.71	33.21
③	3 520.68	80.902	31.324	21.494	94.306	0.72	4.39
③	3 523.49	44.091	15.578	12.731	437.622	0.74	34.37
③	3 524.20	66.836	20.889	15.532	158.716	0.76	10.22
③	3 526.79	55.028	21.228	17.713	153.999	0.72	8.69
③	3 529.69	76.346	28.981	20.037	107.170	0.72	5.35
③	3 532.28	87.187	32.199	25.724	102.471	0.73	3.98
②	3 534.17	81.552	31.605	24.257	129.159	0.72	5.32
②	3 537.15	77.304	29.961	22.813	113.391	0.72	4.97
②	3 539.33	96.096	33.516	20.945	99.819	0.74	4.77
②	3 541.46	105.609	35.314	27.288	115.022	0.75	4.22
②	3 545.02	81.909	29.168	21.655	104.683	0.74	4.83
②	3 547.23	79.236	26.998	33.465	117.236	0.75	3.50
②	3 550.30	77.673	28.153	19.913	118.972	0.73	5.97
②	3 551.97	107.470	38.969	24.410	103.200	0.73	4.23
②	3 554.34	78.379	30.700	18.978	105.869	0.72	5.58
②	3 556.72	135.836	59.448	35.471	95.915	0.70	2.70
②	3 558.66	57.912	18.605	33.175	123.505	0.76	3.72
②	3 560.70	82.122	28.497	23.125	112.306	0.74	4.86
②	3 562.82	75.539	25.222	27.259	97.379	0.75	3.57
②	3 564.71	59.124	18.270	26.422	125.230	0.76	4.74
②	3 565.89	39.798	17.600	13.372	433.486	0.69	32.42
②	3 566.70	67.981	23.494	31.206	113.678	0.74	3.64
②	3 569.46	165.825	50.105	19.119	87.081	0.77	4.55
②	3 571.22	60.938	18.558	19.365	136.401	0.77	7.04
②	3 573.14	79.354	24.442	17.288	219.451	0.76	12.69
②	3 575.24	131.468	36.592	10.948	98.236	0.78	8.97
②	3 576.13	82.646	23.205	20.951	105.444	0.78	5.03
②	3 577.15	90.161	25.281	25.734	114.309	0.78	4.44
②	3 579.23	114.157	24.434	25.126	101.654	0.82	4.05
②	3 581.32	102.075	40.429	31.835	105.115	0.72	3.30
②	3 582.54	98.650	28.489	34.226	104.825	0.78	3.06
①	3 585.05	64.677	19.704	18.500	349.630	0.77	18.90
①	3 587.41	416.338	53.845	49.820	94.602	0.89	1.90
①	3 590.13	657.144	122.117	39.422	81.559	0.84	2.07

影响,筇竹寺组西部更为富砂,又被称为九老洞组。

考虑到华南地块四面环海^[28-30]、上扬子地区陆棚沉积较为开阔、震旦纪至寒武纪无植被等因素,认为四川盆地及其周缘筇竹寺组沉积期广泛分布的粉砂质和局部可见的细砂质沉积物,主要形成于海浪对近古陆滨岸的频繁拍打,以及受气候变化和开阔海面联合影响形成的风暴作用。

3 细粒沉积典型标志

四川盆地及其周缘筇竹寺组主要沉积泥页岩类、粉(细)砂岩类和碳酸盐岩类,发育不同的沉积标志。

3.1 颜色

一般灰绿色、绿色、杂色等为氧化色,指示陆棚中浅水区域;灰黑色、深灰色等为弱还原色,深黑色、黑色等为强还原色,指示陆棚中、深水区域(图 2)。

3.2 宏观沉积构造

研究区目的层岩心资料有限,金石 103 井等关键井的岩心上常见 2 大类沉积构造(图 2)。一是层理构造,包括水平层理、块状构造、脉状层理、波

状层理、透镜状层理等。水平层理揭示静水环境下悬浮沉积作用;块状构造可能与重力流形成的快速堆积有关;后 3 类层理常出现在潮汐环境,多指示潮汐作用。二是同生变形构造,包括火焰状构造、包卷层理、生物扰动、泄水构造、砂球等。同生变形构造可能与地幔上涌形成的地震或火山作用有关,也可能与生物活动或重力流存在关联。

3.3 微观沉积结构

近年来,细粒岩的纹层研究愈发受到重视^[31-33],无论是岩心还是镜下观察到的各类纹层及其相关特征,都能在一定程度上反映沉积环境。筇竹寺组不少外观相似的样品镜下特征存在显著差异,指示了完全不同的沉积环境。镜下观察到的微观沉积结构,主要包括无明显分异的块状微结构、杂乱分异的块状微结构、水平微结构、近平行微结构、递变微结构、软变形微结构等(图 3)。无明显分异的块状微结构不显纹层,为沉积物搅浑后悬浮堆积形成,缺乏机械分异现象;杂乱分异的块状微结构与前者相似,纹层不发育,该结构片状颗粒相对更多,随机杂乱分布;水平微结构富黏土质,多见颗粒水平分布;近平行微结构富长英质,颗粒平

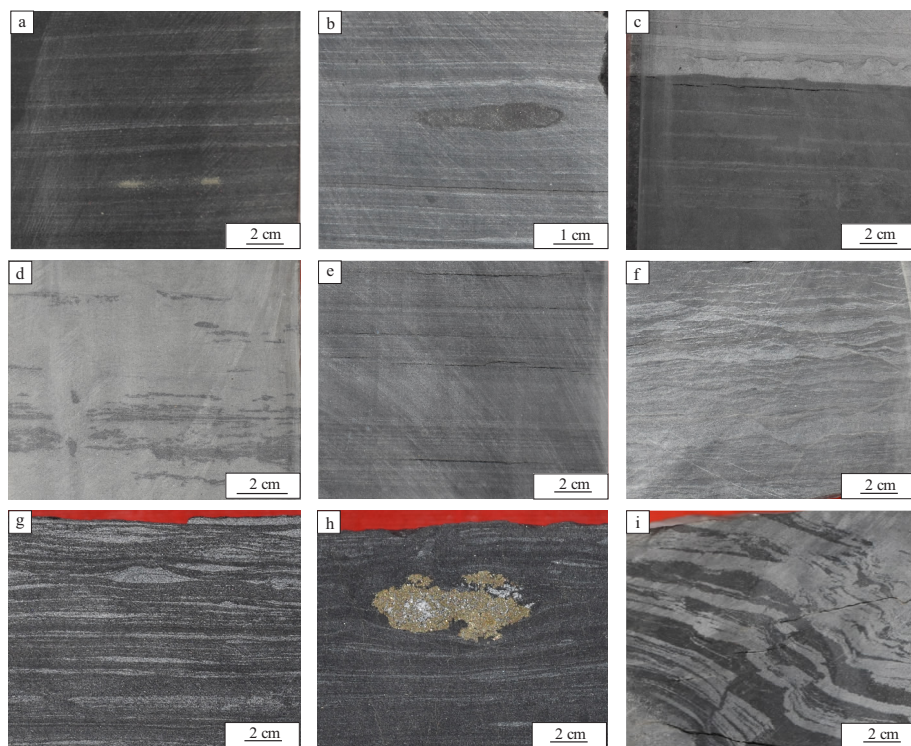


图 2 四川盆地及其周缘下寒武统筇竹寺组沉积构造

a.深灰色粉砂质泥岩,水平层理,黄铁矿顺层理分布,普仁 1 井,3 958.1 m;b.灰色粉砂质泥岩和泥质粉砂岩互层,黄铁矿结核,金页 1 井,3 409.94 m;c.深灰色粉砂质泥岩夹灰色泥质粉砂岩,生物潜穴,金石 103 井,3 334.61 m;d.浅灰色泥质粉砂岩,生物扰动强烈,金石 103 井,3 358.83 m;e.灰色泥质粉砂岩,水平层理,金页 1 井,3 521.2 m;f.灰色泥质粉砂岩,波状层理,金页 1 井,3 522.3 m;g.深灰色泥岩和灰色粉砂质泥岩互层,透镜状层理,金石 103 井,3 321.1 m;h.黄铁矿结核,层理绕结核而过,金石 103 井,3 315.0 m;i.灰黑色粉砂质泥岩和灰白色粉砂质泥岩互层,微型断层和褶皱,金页 2 井,3 725.95 m。

Fig.2 Sedimentary structures of Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin and on its periphery

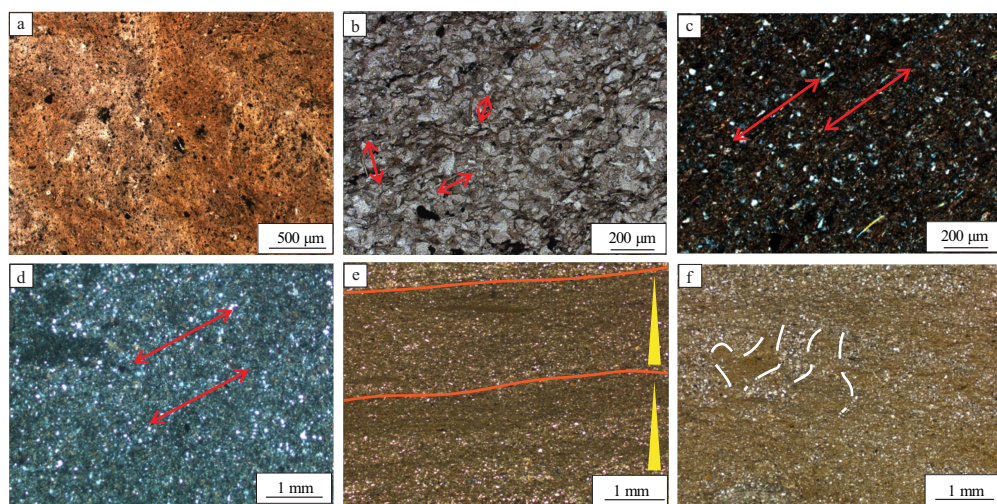


图 3 四川盆地及其周缘下寒武统筇竹寺组微观沉积结构

a. 无明显分异的块状微结构, 峨边葛村剖面, TOC 含量为 0.1%, 隐见搅浑现象; b. 杂乱分异的块状微结构, 峨边葛村剖面, TOC 含量为 0.1%, 片状碎屑随机定向 (红色双向箭头); c. 水平 (红色双向箭头) 微结构, 峨边葛村剖面, TOC 含量为 0.34%; d. 近平行 (红色双向箭头) 微结构, 城口红坪村剖面, TOC 含量为 0.15%, 粉砂质含量高, 粒度粗, 成层性好, 长石含量高, 陆源碎屑供给明显; e. 递变微结构, 城口红坪村剖面, TOC 含量为 0.13%, 多期韵律 (黄色三角), 每期厚度 1.5~2 mm, 底部突变接触 (橙色实线); f. 软变形微结构, 城口红坪村剖面, TOC 含量为 0.34%, 规模较小, 长英质和黏土搅浑 (白色虚线), 可能由泄水作用形成。

Fig.3 Microscopic sedimentary structures of Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin and on its periphery

行或低角度定向分布; 递变微结构来源于机械分异和堆积, 颗粒形成多期韵律, 每期厚度 1.5~2 mm; 软变形微构造规模较小, 常见泄水通道等。

3.4 颗粒几何学标志

扫描电镜广泛运用于细粒岩颗粒自身几何形态 (粒径、扁平度、棱角性、凸度、圆度) 以及颗粒之间的接触关系研究^[34]。本文计算了金页 2 井和长沟村野外露头剖面 19 块粉砂质泥岩样品的扁平度和圆度; 针对筇竹寺组细粒岩样品, 通过扫描电镜得到细粒沉积颗粒的微观图片, 利用多尺度多视域拼接技术, 将得到的微观照片进行整合处理, 再利用 Image J、Matlab 等软件分析颗粒识别图像, 从而得到颗粒微观上的几何特征参数, 形成微观形貌参数平均值统计数据 (表 2)。

贫氧环境沉积的颗粒粒度小, 呈扁平状; 相对富氧环境沉积的颗粒粒度稍大, 圆度略有增加。从颗粒之间的接触关系来看, 扁平度高的颗粒形成集合体, 定向排列, 指示了相对深水环境中缓慢的沉积过程; 相对粗粒、更圆的颗粒形成集合体, 定向性弱, 记录了更为动荡的沉积环境。

3.5 古生物标志

四川盆地及其周缘的筇竹寺组中可见大量海洋古生物化石, 主要包括三叶虫、藻类、海绵骨针、腕足类和软舌螺等。一般来说, 古生物形成和演化更多地与地史年代有关, 但地史年代的变迁又与地球环境变化紧密关联。因此, 古生物标志在一定程

表 2 四川盆地及其周缘下寒武统筇竹寺组粉砂质泥岩颗粒主要几何学参数

Table 2 Main geometric parameters of silty pmudstone articles in Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin and on its periphery

钻井/剖面	样品号	沉积环境	扁平度	圆度
金页 2 井	9	水体相对浅、弱氧化—还原为主	1.72	0.64
	11		1.70	0.64
	12		1.66	0.65
	18		1.78	0.62
	19		1.82	0.62
	21		1.84	0.61
	22		2.16	0.58
	36		1.76	0.63
	37		1.77	0.62
	38		1.77	0.63
	平均值		1.80	0.62
长沟村剖面	23	水体相对深、安静、还原为主	1.99	0.58
	31		2.38	0.56
	32		1.85	0.61
	33		1.70	0.64
	34		1.86	0.61
	35		1.87	0.61
	44		1.70	0.64
	45		1.80	0.61
	平均值		1.89	0.61

度上也能反映沉积的古环境背景。软舌螺在麦地坪组和筇竹寺组中下部占比较高, 这些生物以底栖固着生长为主, 既可出现在局限的海水中, 也适应广阔海洋环境。随着时间推移, 至筇竹寺组沉积

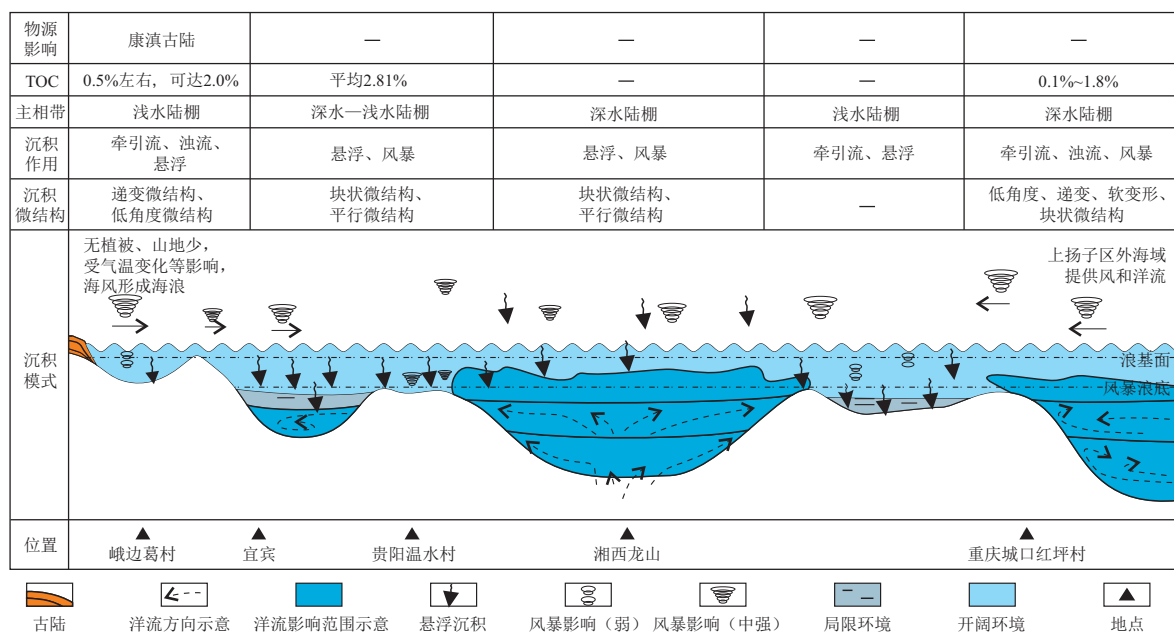


图 5 四川盆地及其周缘下寒武统筇竹寺组沉积分布

Fig.5 Distribution of sedimentary characteristics of Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin and on its periphery

质沉积物和重力流砂体^[8-9,14];考虑到筇竹寺组和下伏富含磷质、也含硅质的麦地坪组界限不易区分^[13],以及全区仅少量钻井揭示重力流砂体^[8],总体认为四川盆地及其周缘筇竹寺组深水陆棚亚相以泥质沉积物为主。

筇竹寺组可以划分为 3 个三级层序,每个三级层序的底部对应深水陆棚亚相,形成了井研—犍为地区①、⑤、⑨号富有机质泥页岩层^[4]。其余层段也发育深水陆棚沉积物,平面上主要分布于绵阳—资阳—泸州一带以及贵阳—常德西南等地区^[15]。

4.3 细粒沉积时空分布

四川盆地及其周缘筇竹寺组可以划分为 3 个

三级层序,每个三级层序在不同时期的分布和充填特征存在差异^[13,37]。

筇竹寺组底部层序主要分布于中部拗陷区、北部拗陷区和西部隆起区。受基准面变化和可容空间大小的控制,西部隆起区主要发育浅水陆棚亚相,康滇古陆提供碎屑供给,经由海风和波浪—潮汐联合作用搬运至此并堆积,在海侵时期受海平面上涨影响,逐渐过渡为深水陆棚亚相(图 6)。北部拗陷区以深水陆棚亚相为主要沉积类型,反映了更为充裕的可容空间。中部拗陷区和北部拗陷区类似,以深水陆棚亚相为主。

筇竹寺组中部层序主要分布于中部拗陷区、北

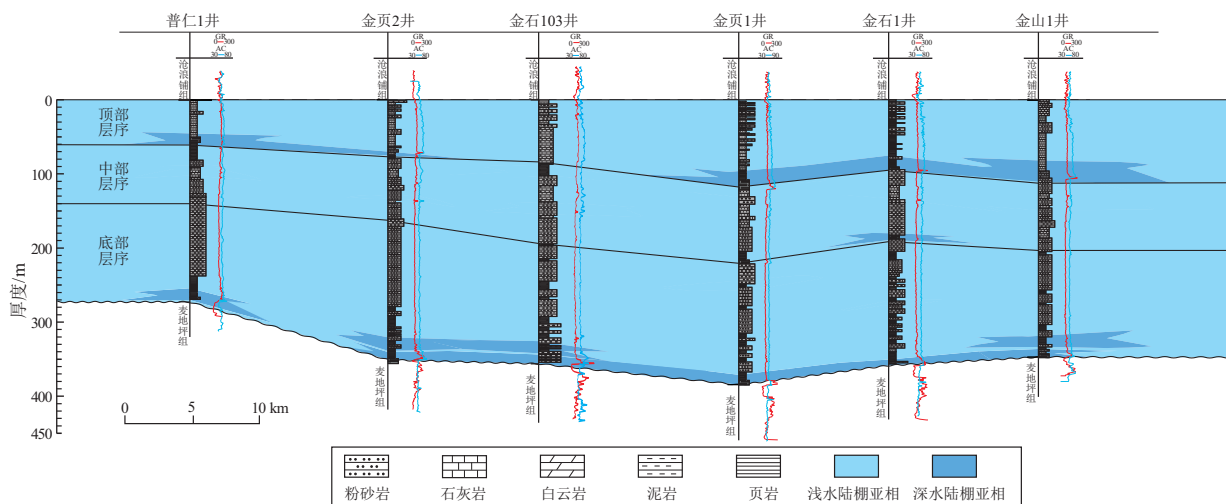


图 6 四川盆地井研—犍为地区下寒武统筇竹寺组沉积亚相多井对比

Fig.6 Multi-well correlation of sedimentary subfacies of Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Jingyan-Qianwei area, Sichuan Basin

部拗陷区和西部隆起区, 钻井和野外露头资料揭示, 其还在中部隆起区和东部隆起区之间的低洼地带局限分布。中部拗陷区以深水陆棚亚相为主。受可容空间增长速率持续减小的影响, 西部隆起区发育浅水陆棚亚相, 沉积粉砂岩、泥质粉砂岩和碳酸盐胶结粉砂岩, 反映了地势相对高点在海平面动荡过程中的沉积多变性(图 6)。北部拗陷区继承了底部层序的沉积特征, 以深水陆棚亚相为主要沉积类型。

筇竹寺组顶部层序形成于上扬子地区“广盆”阶段^[13], 所有构造—沉积分区内的钻井和露头皆揭示了该套层序的存在。中部拗陷区、西部隆起区、北部拗陷区均以浅水陆棚亚相为主要沉积类型(图 7), 粉砂质含量较高, 物源供给来自于西部和北部诸古陆。中部隆起区北部存在宣汉—开江古隆起^[38], 其西南部高石梯—磨溪地区单井上粉砂质含量相对较高, 再往南粉砂质供给不足, 沉积碳酸盐质粉砂岩(林 1 井)和灰岩(丁山 1 井)。东部隆起区与中部隆起区类似, 碎屑物质供给不足, 筇竹寺组顶部发育灰岩(宜地 2 井)或灰质泥岩(宜页 1 井)。

4.4 陆棚细粒岩沉积的影响因素

陆棚沉积的水动力条件复杂而多样, 常受潮汐、海流和风暴的控制, 发育一定规模的交错层理^[10]。浅水陆棚的沉积物来源, 一是陆源物质越过滨岸带沉积而成; 二是原地生成, 如生物沉积、火山沉积和自生沉积^[10]。

4.4.1 古陆和古地貌的影响

古陆对四川盆地及其周缘筇竹寺组细粒沉积

的影响存在强—中—弱程度差异^[13], 主要表现为西部康滇古陆碎屑供给能力最强(图 1), 持续性地提供砂和粉砂。虽然推断古陆周缘均分布滨岸相沉积物, 但峨边葛村和雷波肖滩剖面的筇竹寺组更高的细砂岩含量, 则揭示了西部地区更广的滨岸相分布范围。

在远离古陆的陆棚主体区, 沉积物分异主要受控于 4 类地貌分区, 分别为近海平缓区、近海局部凸起区、近海局部洼陷区和近斜坡区(图 8)。近海平缓区和局部凸起区沉积水体较浅, 属于浅水陆棚亚相, 其中近海平缓区主要发育波浪、潮汐影响的砂质沉积物, 有机碳含量较低; 相对较高的局部凸起区, 由于蒸发、底部灯影组碳酸盐岩供源等多因素影响, 易于发育碳酸盐质沉积物, 有机碳含量同样低。近海局部洼陷区和近斜坡区沉积水体较深, 属于深水陆棚亚相, 其中局部洼陷区沉积环境相对闭塞、局限, 水体安静, 以悬浮载荷为主, 发育具水平层理的泥岩和粉砂质泥岩, 有机碳含量较高; 近斜坡区主要发育海流、洋流影响的泥质沉积物, 有机碳含量最高。

4.4.2 波浪和潮汐的影响

上扬子地区筇竹寺组沉积期, 研究区主体处于陆棚环境, 海水很浅, 西部和北部发育供源能力强弱不一的古陆, 西部井研—犍为地区钻井和峨边葛村露头、北部天星 1 井和南江长沟村露头等均揭示沉积物以粉砂岩为主, 推断古陆难以形成大面积的河流、三角洲沉积体。海面上温度、湿度的变化很容易形成风场, 而早寒武世尚无大规模植被发育, 海风畅通无阻, 波浪作用较强。海风侵蚀古陆, 形

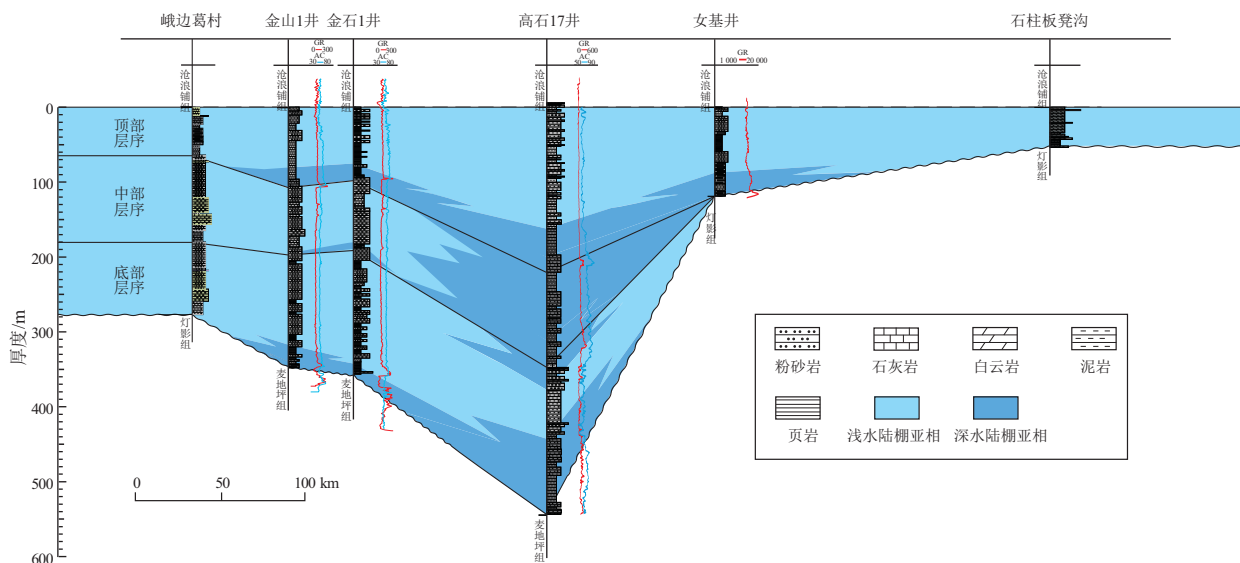


图 7 四川盆地地下寒武统筇竹寺组沉积亚相多井对比

Fig.7 Multi-well correlation of sedimentary subfacies of Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin

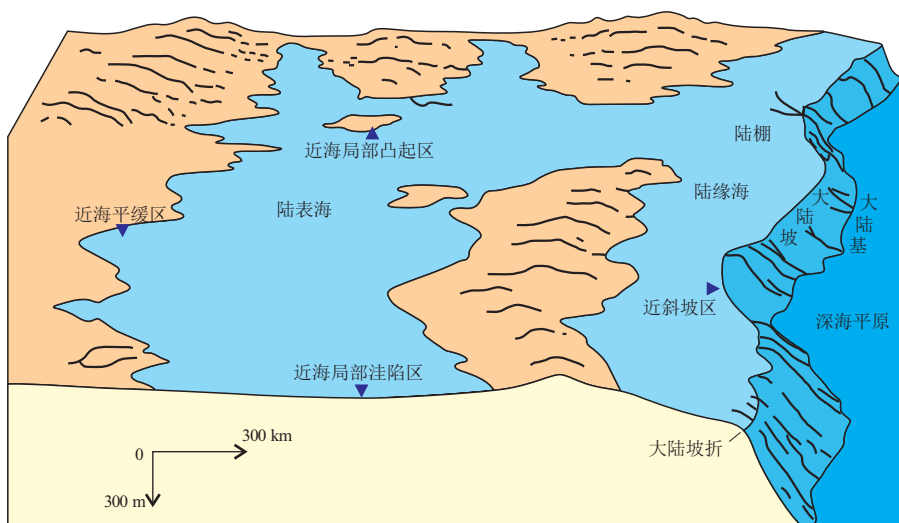


图 8 陆棚及其沉积地貌示意
据 HECKEL(1972), 转引自参考文献[26]。

Fig.8 Conceptual model for continental shelf and its sedimentary geomorphology

成粉砂, 提供物源, 粉砂在海洋中悬浮沉降, 与泥质共同沉积形成层理或各类微观沉积结构; 波浪(受海风影响)和潮汐(受月球影响)反复冲刷古陆, 形成长英质细粒碎屑(图 9), 是为本区内另一类型物源。这 2 类物源提供的沉积物堆积于富氧环境, 颜色以灰色、浅灰色为主, 粉砂质含量较高, 可见平行层理、透镜状层理、波状层理和脉状层理, 薄片观察可见低角度微结构、近平行微结构、递变微结构, 反映了定向牵引流的改造和悬浮作用的影响。从颗粒几何特征来看, 细粒度 (>10 μm) 似圆棱角状颗粒占比较多。由于沉积水体较浅, 氧化作用显著, 加之波浪和潮汐的反复淘洗, 不利于有机质的保

存, 该影响下形成的沉积物有机碳含量较低, TOC 含量大多小于 0.45%。

4.4.3 海水蒸发的影响

在浅水陆棚亚相中, 与蒸发作用密切相关的碳酸盐质粉砂岩或碳酸盐岩分布较少, 这与其形成条件较为苛刻有关。水体较浅、水温适中、古陆影响较弱的地带是碳酸盐质粉砂岩或碳酸盐岩沉积的主要区域。沉积岩颜色较浅, 以灰色、浅灰色为主, 反映了氧化作用的影响; 部分手标本特征常和受波浪—潮汐扰动影响形成的岩石相近, X 衍射测试则揭示其富碳酸盐质(图 9)。常见水平层理、块状层理等沉积构造; 镜下可见长英质碎屑颗粒被大量

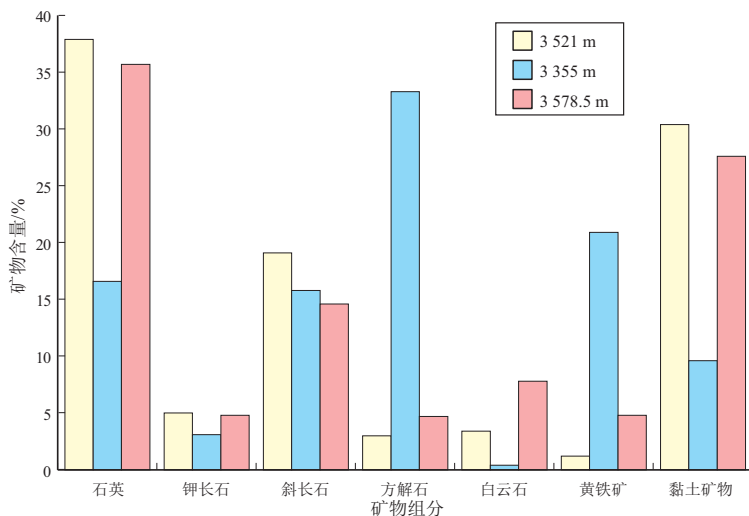


图 9 四川盆地金石 103 井不同影响因素下寒武统筇竹寺组细粒岩组分对比

3 521 m, 波浪和潮汐的影响, 深灰色粉砂质泥岩和灰色泥质粉砂岩互层, TOC 含量为 0.23%; 3 355 m, 海水蒸发的影响, 灰色富碳酸盐细粒岩, TOC 含量为 0.12%; 3 578.5 m, 悬浮作用的影响, 深灰色粉砂质泥岩, TOC 含量为 0.45%。

Fig.9 Comparison of fine-grained rock composition of Lower Cambrian Qiongzhusi Formation of well Jinshi 103 in Sichuan Basin under different influencing factors

方解石胶结物胶结。受到氧化作用的影响,蒸发环境下形成的岩石 TOC 含量较低,普遍小于 0.45%。海水蒸发作用主要记录在筇竹寺组顶部层序中,这与筇竹寺组沉积期由湿转旱的古气候相关。

4.4.4 悬浮作用的影响

在远离古陆的局部洼陷地区,风浪作用不易到达,沉积水体长期安静,粉砂供给较为贫乏,泥质沉积物便以悬浮方式不断堆积,形成灰色、深灰色泥页岩。由于缺乏单向、双向水流的持续作用,岩石多发育块状层理,同沉积期亦可发生软变形,形成变形构造。

镜下观察可见块状微结构、搅浑微结构和递变微结构;颗粒多呈中细粒(2~8 μm)扁平状。较深的水体易于还原作用的发生,岩心可观察到黄铁矿(图 9),受此影响的沉积物 TOC 含量相对更高,一般大于 0.45%。

4.4.5 上升洋流的影响

在中部隆起区东南缘和东部隆起区,筇竹寺组内往往发育一套高有机碳含量的岩层。该套岩层 TOC 含量多大于 2%,甚至可达 8%。从微观沉积结构来看,其呈极细颗粒(<2 μm)扁平状,定向排列,以泥页岩为主。

发育高 TOC 岩层的丁山 1 井和渝参 9 井地处中部隆起区,该区几乎不发育筇竹寺组中下部层序^[13];至筇竹寺组顶部层序沉积期,上扬子地区处于广盆阶段,纵向上沉降已经较为稳定且均匀,推断 TOC 的显著增高与横向上所处的地理位置有关。中部隆起区东南缘和东部隆起区均靠近中—上扬子东南部深水斜坡相区,该套富有机质泥页岩应该受到了东南部扬子地块沉积中心形成的上升洋流的影响。前期研究已经表明,上升洋流能够提高古生产力、促进还原环境的形成,对有机质生成和保存具有积极影响^[27,39-40],是海洋中局部高 TOC 区形成的重要因素之一。

调研发现,震旦纪—寒武纪洋流存在从上扬子地区东南部往西方向活动的轨迹,即研究区东南部为洋流注入来源^[28-30];同时,相较于狭窄的中部拗陷区和北部拗陷区,中部隆起区东南缘和东部隆起区南部可供洋流活动的范围更为广阔,洋流更易形成。生物标志化合物也反映了上升洋流的影响^[41],涪潭地区地处中部隆起区东南缘,生物标志化合物揭示母质为海洋来源,处于半深水环境;地处中部拗陷区南部、东部隆起区西侧的松林地区生物标志化合物反映了陆源母质的影响,说明研究区东南部洋流的影响可能未触及中部拗陷区。上扬

子地区筇竹寺组沉积期海风的影响显著,巨大波浪往下挤压下伏海水和沉积物,待风力降低,海水发生回弹,形成的负压力可以促使深部洋流往浅层运动。

5 细粒沉积模式

四川盆地及其周缘筇竹寺组沉积初期差异沉降作用显著,层序厚度变化大^[13],受此影响,不同地区沉积特征及影响因素差异较大。西部隆起区受到西侧古陆持续供源的影响,加之隆起区仅能提供有限的可容空间,沉积亚相以浅水陆棚为主,且受波浪和潮汐联合影响显著;较浅水体的不断搅动,使得沉积环境富氧,广泛发育低 TOC 含量的粉砂岩,往西(峨边葛村剖面露头)局部见细砂岩。北部拗陷区和中部拗陷区发育深水陆棚亚相,尤其在北部拗陷区,受上升洋流的影响,在低洼地带沉积高 TOC 泥页岩。其余低洼地区未受到上升洋流影响,在深水陆棚亚相中沉积中等 TOC 泥页岩(图 10a)。

筇竹寺组沉积中期差异沉降作用不断减弱,层序厚度差异持续减小,可容空间增长速率减缓,拗陷区洋流的影响逐步消退。但沉积格局还是多多少少继承下来,原先洋流影响发生在地形低洼地带,随着洋流影响的消退以及水体相对变浅,这些低洼地带发育的深水陆棚亚相泥岩 TOC 含量有所降低(图 10b)。安静环境下悬浮载荷影响的范围有所扩大,在中部隆起区和东部隆起区之间,亦发育深水陆棚亚相泥页岩。在西部隆起区,虽然海平面持续上涨,但由于可容空间增长速率较慢,雅安一带仍未接受沉积,证据便是汉深 1 井不发育筇竹寺组中部层序^[13]。

筇竹寺组沉积末期,上扬子地区稳定沉降,进入“广盆”阶段,层序厚度趋于一致,平面上沉积微相变化不大,可容空间增长速率较慢。自西往东,受波浪和潮汐联合影响的浅水陆棚亚相覆盖了大部分研究区;在北部拗陷区继承性发育深水陆棚亚相;中部拗陷区深水陆棚亚相的分布范围较前期进一步缩小,仅分布在自贡一带;由于地形影响,靠近古陆的雅安地区虽然已被海水淹没,但与外界沟通不畅,形成局限、安静、受悬浮作用影响显著的沉积环境(图 10c)。在丁山 1 井区,受控于沉积地形较高和碎屑物质供给较少,非常局限地发育受蒸发作用显著影响的碳酸盐质沉积物。

6 结论

(1) 结合四川盆地及其周缘下寒武统筇竹寺

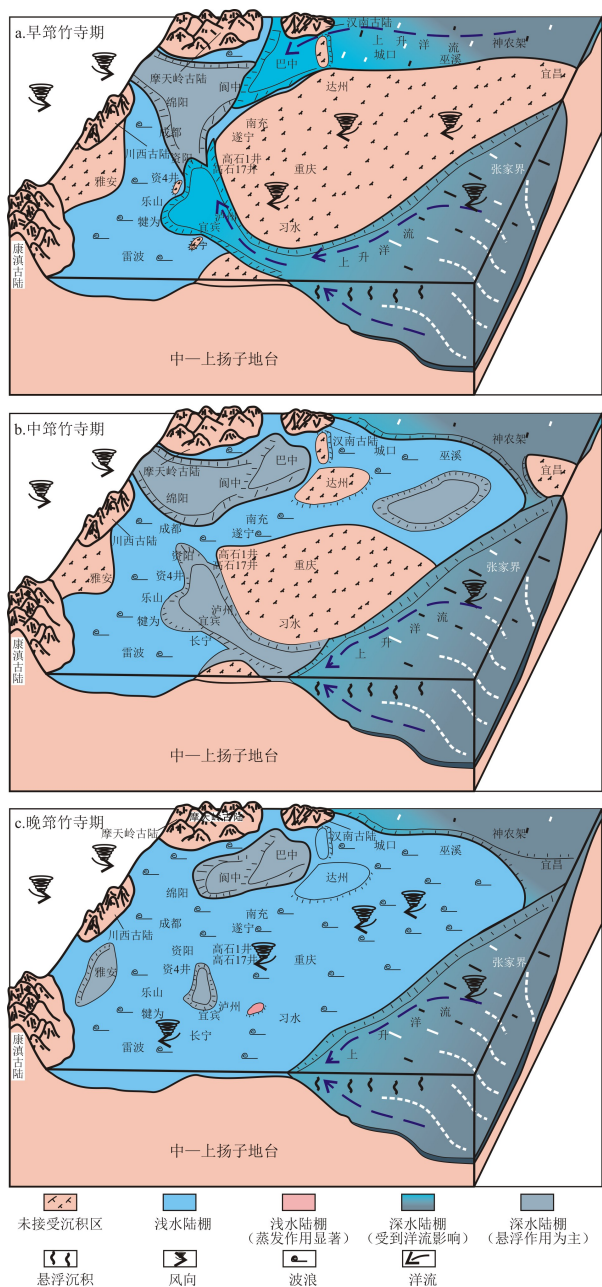


图10 四川盆地及其周缘下寒武统筇竹寺组细粒岩沉积模式

古陆地势为示意,受控于资料,无法明确古陆相对高差,康滇古陆为最主要供源区。

Fig.10 Sedimentary model of fine-grained rock of Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin and on its periphery

组构造背景和层序特征的调研,开展研究区早寒武世沉积背景研究,明确筇竹寺组沉积于贫氧和缺氧的环境,沉积水体由深变浅,所处古气候由湿转旱。西侧康滇古陆为主要碎屑供源区,粉砂质碎屑经由海洋、风等载体进入沉积区。

(2) 基于颜色、宏观沉积构造、微观沉积结构、颗粒几何学和古生物等特征,在四川盆地及其周缘筇竹寺组内划分出滨岸相和陆棚相,进一步将陆棚

相划分为浅水陆棚亚相和深水陆棚亚相。浅水陆棚亚相主要发育粉砂质泥岩和砂泥互层泥岩,也可见富碳酸盐沉积物,TOC含量总体较低;深水陆棚亚相主要发育泥页岩,TOC含量总体较高。

(3) 波浪和潮汐联合作用、海水蒸发作用、悬浮作用、上升洋流以及沉积古地貌是影响四川盆地及其周缘下寒武统筇竹寺组细粒沉积的关键因素。基于细粒沉积特征、影响因素和沉积相带空间分布的认识,建立了四川盆地及其周缘下寒武统筇竹寺组细粒岩沉积模式。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献/Authors' Contributions

熊亮和邓虎成参与研究设计和论文审核;吴冬、魏力民和王同参与论文写作和修改;周桦、曹凯旋和解馨慧参与实验设计;马若龙和钟雨菊完成实验操作。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

The study was designed and examined by XIONG Liang and DENG Hucheng. The manuscript was drafted and revised by WU Dong, WEI Limin and WANG Tong. The experiments were designed by ZHOU Hua, CAO Kaixuan and XIE Xinhui. The experimental operation was completed by MA Ruolong and ZHONG Yutao. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献:

[1] 姜在兴,梁超,吴靖,等.含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J].石油学报,2013,34(6):1031-1039.
JIANG Zaixing, LIANG Chao, WU Jing, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1031-1039.

[2] 刘可禹,刘畅.“化学—沉积相”分析:一种研究细粒沉积岩的有效方法[J].石油与天然气地质,2019,40(3):491-503.
LIU Keyu, LIU Chang. “Chemo-sedimentary facies” analysis: an effective method to study fine-grained sedimentary rocks[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 491-503.

[3] 胡素云,白斌,陶士振,等.中国陆相中高成熟度页岩油非均质地质条件与差异富集特征[J].石油勘探与开发,2022,49(2):224-237.
HU Suyun, BAI Bin, TAO Shizhen, et al. Heterogeneous geological conditions and differential enrichment of medium and high maturity continental shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(2): 224-237.

[4] 郭彤楼,熊亮,叶素娟,等.输导层(体)非常规天然气勘探理论与实践:四川盆地新类型页岩气与致密砂岩气突破的启示[J].石油勘探与开发,2023,50(1):24-37.
GUO Tonglou, XIONG Liang, YE Sujuan, et al. Theory and practice of unconventional gas exploration in carrier beds: insight from the breakthrough of new type of shale gas and tight gas in Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(1): 24-37.

[5] 何治亮,聂海宽,胡东风,等.深层页岩气有效开发中的地质

- 问题:以四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组为例[J].石油学报,2020,41(4):379-391.
- HE Zhiliang, NIE Haikuan, HU Dongfeng, et al. Geological problems in the effective development of deep shale gas: a case study of Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi formations in Sichuan Basin and its periphery[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(4):379-391.
- [6] 张金川, 史森, 王东升, 等. 中国页岩气勘探领域和发展方向[J]. 天然气工业, 2021, 41(8):69-80.
- ZHANG Jinchuan, SHI Miao, WANG Dongsheng, et al. Fields and directions for shale gas exploration in China[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8):69-80.
- [7] 黎茂稳, 马晓潇, 金之钧, 等. 中国海、陆相页岩层系岩相组合多样性与非常规油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1):1-25.
- LI Maowen, MA Xiaoxiao, JIN Zhijun, et al. Diversity in the lithofacies assemblages of marine and lacustrine shale strata and significance for unconventional petroleum exploration in China[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1):1-25.
- [8] 刘忠宝, 高波, 张钰莹, 等. 上扬子地区下寒武统页岩沉积相类型及分布特征[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1):21-31.
- LIU Zhongbao, GAO Bo, ZHANG Yuying, et al. Types and distribution of the shale sedimentary facies of the Lower Cambrian in Upper Yangtze area, South China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1):21-31.
- [9] 赵建华, 金之钧, 林畅松, 等. 上扬子地区下寒武统筇竹寺组页岩沉积环境[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(4):701-715.
- ZHAO Jianhua, JIN Zhijun, LIN Changsong, et al. Sedimentary environment of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation shale in the Upper Yangtze region[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(4):701-715.
- [10] 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 5版. 北京:石油工业出版社, 2020.
- ZHU Xiaomin. Sedimentary petrology[M]. 5th ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2020.
- [11] 王红岩, 施振生, 孙莎莎, 等. 四川盆地及周缘志留系龙马溪组一段深层页岩储层特征及其成因[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(1):66-75.
- WANG Hongyan, SHI Zhensheng, SUN Shasha, et al. Characterization and genesis of deep shale reservoirs in the first member of the Silurian Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin and its periphery[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(1):66-75.
- [12] 王同, 熊亮, 董晓霞, 等. 川南地区筇竹寺组新层系页岩储层特征[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(3):443-451.
- WANG Tong, XIONG Liang, DONG Xiaoxia, et al. Characteristics of shale reservoir in new strata of Qiongzhusi Formation in southern Sichuan[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3):443-451.
- [13] 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.
- [14] 范海经, 邓虎成, 伏美燕, 等. 四川盆地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 Meiyuan, 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.
- [15] 刘忠宝, 王鹏威, 聂海宽, 等. 中上扬子地区寒武系页岩气富集条件及有利区优选[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(9):3694-3707.
- LIU Zhongbao, WANG Pengwei, NIE Haikuan, et al. Enrichment conditions and favorable prospecting targets of Cambrian shale gas in Middle-Upper Yangtze[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(9):3694-3707.
- [16] 刘树根, 孙玮, 宋金民, 等. 四川盆地海相油气分布的构造控制理论[J]. 地学前缘, 2015, 22(3):146-160.
- LIU Shugen, SUN Wei, SONG Jinmin, et al. Tectonics-controlled distribution of marine petroleum accumulations in the Sichuan Basin, China[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3):146-160.
- [17] 高祺瑞, 赵政璋. 中国油气新区勘探(第五卷):中国南方海相油气地质及勘探前景[M]. 北京:石油工业出版社, 2001.
- GAO Qirui, ZHAO Zhengzhang. The frontier petroleum exploration in China (Volume 5)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.
- [18] WANG Jian, LI Zhengxiang. History of Neoproterozoic rift basins in South China: implications for Rodinia break-up[J]. Precambrian Research, 2003, 122(1/4):141-158.
- [19] 李献华, 李武显, 何斌. 华南陆块的形成与 Rodinia 超大陆聚合—裂解:观察、解释与检验[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2012, 31(6):543-559.
- LI Xianhua, LI Wuxian, HE Bin. Building of the South China block and its relevance to assembly and breakup of Rodinia supercontinent: observations, interpretations and tests[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2012, 31(6):543-559.
- [20] 刘树根, 孙玮, 罗志立, 等. 兴凯地裂运动与四川盆地组合油气勘探[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2013, 40(5):511-520.
- LIU Shugen, SUN Wei, LUO Zhili, et al. Xingkai taphrogenesis and petroleum exploration from Upper Sinian to Cambrian Strata in Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2013, 40(5):511-520.
- [21] 梁霄, 马韶光, 李郭琴, 等. 上斜坡区筇竹寺组沉积环境及其页岩气勘探潜力:以四川盆地威远地区威 207 井为例[J]. 地质科技通报, 2022, 41(5):68-82.
- LIANG Xiao, MA Shaoguang, LI Guoqin, et al. Sedimentary environment and shale gas exploration potential of Qiongzhusi Formation in the upslope area: a case study on well W-207, Weiyuan area, Sichuan Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(5):68-82.
- [22] 牟传龙, 梁薇, 周昱昱, 等. 中上扬子地区早寒武世(纽芬兰世—第二世)岩相古地理[J]. 沉积与特提斯地质, 2012,

- 32(3):41-53.
- MOU Chuanlong, LIANG Wei, ZHOU Kenken, et al. Sedimentary facies and palaeogeography of the middle-upper Yangtze area during the Early Cambrian (Terreneuvian-Series 2) [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2012, 32(3):41-53.
- [23] 刘树根, 王一刚, 孙玮, 等. 拉张槽对四川盆地海相油气分布的控制作用[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(1):1-23.
- LIU Shugen, WANG Yigang, SUN Wei, et al. Control of intracratonic sags on the hydrocarbon accumulations in the marine strata across the Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2016, 43(1):1-23.
- [24] DILL H. Metallogenesis of Early Paleozoic graptolite shales from the Graefenthal Horst (Northern Bavaria-Federal Republic of Germany) [J]. *Economic Geology*, 1986, 81(4):889-903.
- [25] 伏美燕, 李娜, 黄茜, 等. 滨岸—浅海混合沉积对海平面与气候变化的响应:以塔里木盆地巴麦地区石炭系为例[J]. *沉积学报*, 2017, 35(6):1110-1120.
- FU Meiyang, LI Na, HUANG Qian, et al. Shoreline-neritic mixed sedimentation response to sea level change and paleoclimate: a case study from Carboniferous in Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(6):1110-1120.
- [26] 傅恒, 韩建辉, 宋荣彩, 等. *地质学基础* [M]. 北京:地质出版社, 2021.
- FU Heng, HAN Jianhui, SONG Rongcai, et al. *Fundamentals of geology* [M]. Beijing: Geological publishing House, 2021.
- [27] 夏威, 于炳松, 王运海, 等. 黔北牛蹄塘组和龙马溪组沉积环境及有机质富集机理:以 RY1 井和 XY1 井为例[J]. *矿物岩石*, 2017, 37(3):77-89.
- XIA Wei, YU Bingsong, WANG Yunhai, et al. Study on the depositional environment and organic accumulation mechanism in the Niutitang and Longmaxi formation, North Guizhou province: a case study of well Renye 1 and well Xiye 1 [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2017, 37(3):77-89.
- [28] CAWOOD P A, PISAREVSKY S A. Was Baltica right-way-up or upside-down in the Neoproterozoic [J]. *Journal of the Geological Society*, 2006, 163(5):753-759.
- [29] LI Zhengxiang, BOGDANOVA S V, COLLINS A S, et al. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis [J]. *Precambrian Research*, 2008, 160(1/2):179-210.
- [30] ZHAO Hanqing, ZHANG Shihong, ZHU Maoyan, et al. Paleomagnetic insights into the Cambrian biogeographic conundrum: did the North China craton link Laurentia and East Gondwana? [J]. *Geology*, 2021, 49(4):372-376.
- [31] 刘国恒, 黄志龙, 姜振学, 等. 鄂尔多斯盆地延长组湖相页岩纹层发育特征及储集意义[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(3):408-417.
- LIU Guoheng, HUANG Zhilong, JIANG Zhenxue, et al. The characteristic and reservoir significance of lamina in shale from Yanchang Formation of Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(3):408-417.
- [32] 孔祥鑫, 姜在兴, 韩超, 等. 束鹿凹陷沙三段下亚段细粒碳酸盐纹层特征与储集意义[J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23(4):19-26.
- KONG Xiangxin, JIANG Zaixing, HAN Chao, et al. Laminations characteristics and reservoir significance of fine-grained carbonate in the lower 3rd member of Shahejie Formation of Shulu Sag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(4):19-26.
- [33] 郭来源, 刘峥君, 解习农. 南襄盆地泌阳凹陷核桃园组三段纹层状泥页岩地球化学特征及其成因解释[J]. *现代地质*, 2018, 32(1):133-144.
- GUO Laiyuan, LIU Zhengjun, XIE Xinong. Geochemical characteristics and genetic interpretation of laminated shales of the third member of Hetaoyuan Formation in the Biyang Depression of Nanxiang Basin [J]. *Geoscience*, 2018, 32(1):133-144.
- [34] MORA C F, KWAN A K H. Sphericity, shape factor, and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital image processing [J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(3):351-358.
- [35] 吴维义, 郑昊林, 杨兴莲. 贵州金沙寒武系牛蹄塘组的古盘虫类三叶虫[J]. *古生物学报*, 2018, 57(3):304-311.
- WU Weiyi, ZHENG Haolin, YANG Xinglian. A study of the eodiscoid trilobite from the Cambrian Niutitang Formation of Jinsha, Guizhou [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2018, 57(3):304-311.
- [36] 刘璠. 滇东地区寒武系第二统软舌螺动物研究[D]. 西安:西北大学, 2021.
- LIU Fan. Palaeobiological study of hyoliths from the Cambrian Series 2 Lagerstätten in eastern Yunnan, China [D]. Xi'an: Northwest University, 2021.
- [37] 赵立可, 李文皓, 和源, 等. 四川盆地麦地坪组—筇竹寺组沉积充填规律及勘探意义[J]. *天然气勘探与开发*, 2020, 43(3):30-38.
- ZHAO Like, LI Wenhao, HE Yuan, et al. Sedimentation and filling laws of Maidiping-Qiongzhusi formations in Sichuan Basin and their significance of oil and gas geological exploration [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2020, 43(3):30-38.
- [38] 谷志东, 殷积峰, 姜华, 等. 四川盆地宣汉—开江古隆起的发现及意义[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(6):893-904.
- GU Zhidong, YIN Jifeng, JIANG Hua, et al. Discovery of Xuanhan-Kaijiang paleouplift and its significance in the Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(6):893-904.
- [39] DEMAISON G J, MOORE G T. Anoxic environments and oil source bed genesis [J]. *Organic Geochemistry*, 1980, 2(1):9-31.
- [40] 王玉满, 陈波, 李新景, 等. 川东北地区下志留统龙马溪组上升洋流相页岩沉积特征[J]. *石油学报*, 2018, 39(10):1092-1102.
- WANG Yuman, CHEN Bo, LI Xinjing, et al. Sedimentary characteristics of upwelling facies shale in Lower Silurian Longmaxi Formation, northeast Sichuan area [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(10):1092-1102.
- [41] 杨平, 汪正江, 谢渊, 等. 黔北下寒武统牛蹄塘组烃源岩的生物标志物特征和沉积环境[J]. *地质通报*, 2012, 31(11):1910-1921.
- YANG Ping, WANG Zhengjiang, XIE Yuan, et al. The biomarker characteristics and sedimentary environment of Early Cambrian Niutitang Formation source rock in northern Guizhou [J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(11):1910-1921.