

川东北旺苍地区栖霞组 地球化学特征及其古环境意义

张运周¹, 徐胜林¹, 陈洪德^{1,2}, 林良彪^{1,2}, 董翼昕¹, 余瑜¹, 张瑶³

(1. 成都理工大学沉积地质研究院, 成都 610059; 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. 中国石化西南油气分公司石油工程技术研究院, 四川 德阳 618000)

摘要: 为研究川东北地区中二叠统栖霞组沉积期古环境, 对川东北旺苍地区鹿渡坝剖面进行了野外露头观察, 开展了室内镜下薄片鉴定与地球化学分析。结果表明, 栖霞组 19 件样品 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 呈现离散型, 不具有线性关系, 且均满足 $\delta^{18}\text{O} > -6\text{‰}$, $\text{Mn}/\text{Sr} \leq 0.6$, $\text{Fe}/\text{Sr} < 3$, $\text{MgO}/\text{CaO} < 0.125$, 可作为古环境分析的可靠对象。陆源元素 Al_2O_3 和 TiO_2 含量低, 且呈强烈正相关, ΣREE 与 $\Sigma(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2)$ 有较强烈的正相关, 结合其他相关的主量元素和微量元素特征 ($\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 和 U/Th 的相关性等) 表明, 栖霞组形成于缺氧—贫氧环境; Sr/Ba 介于 21.9~261.9 之间, 说明海平面相对较高, 故陆源物质含量稀少, 且沉积时期陆源碎屑物受古水深的控制; 碳、氧同位素揭示古海洋温度介于 17.62~28.43 °C, 古盐度介于 129.07~135.21, MgO/CaO 比值介于 0.007~0.029, 揭示沉积古环境主体为相对温暖的热带潮湿气候, 水深在小范围内呈震荡式变化, 经历过 2 次海侵—海退旋回。

关键词: 地球化学; 沉积环境; 碳酸盐岩; 栖霞组; 中二叠统; 川东北

中图分类号: TE121.31

文献标识码: A

Geochemical characteristics and paleo-environmental implications of Middle Permian Qixia Formation in Wangcang, northern Sichuan

ZHANG Yunzhou¹, XU Shenglin¹, CHEN Hongde^{1,2}, LIN Liangbiao^{1,2}, DONG Yixin¹, YU Yu¹, ZHANG Yao³

(1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation (Chengdu University of Technology), Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. Petroleum Engineering Technology Research Institute, SINOPEC Southwest Oil and Gas Branch Company, Deyang, Sichuan 618000, China)

Abstract: The sedimentary paleoenvironment of the Middle Permian Qixia Formation in northeastern Sichuan Basin was studied based on outcrop observations and laboratory analyses. The data correlations of the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of 19 samples from the Qixia Formation showed that there was no linear relationship between them. The samples are reliable targets for paleoenvironmental analyses since $\delta^{18}\text{O} > -6\text{‰}$, $\text{Mn}/\text{Sr} \leq 0.6$, $\text{Fe}/\text{Sr} < 3$, and $\text{MgO}/\text{CaO} < 0.125$. The contents of terrigenous elements (Al_2O_3 and TiO_2) are low, and are strongly and positively correlated. The ΣREE and $\Sigma(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2)$ also showed a positive relationship. The characteristics of other main and trace elements indicated that the Qixia Formation was formed in a hypoxic or oxygen-depleted environment. The Sr/Ba value ranges from 21.9–261.9, indicating that the sea level was relatively high, so the terrigenous material content is low, and the terrigenous detrital sediments were controlled by paleo-water depth during sedimentation. The carbon and oxygen isotopes revealed that the ancient oceanic temperature ranged from 17.62–28.43 °C, the paleosalinity ranged from 129.07–135.21, and the ratio of MgO/CaO ranged from 0.007–0.029, revealing that the paleoenvironmental climate was relatively warm and humid. Water depth fluctuated within a small range and experienced two transgressive and regressive cycles.

Key words: geochemistry; sedimentary environment; carbonate rock; Qixia Formation; Middle Permian; north-eastern Sichuan

收稿日期: 2017-08-15; 修订日期: 2018-02-07。

作者简介: 张运周 (1991—), 男, 硕士, 沉积学专业。E-mail: bochengjiaye@126.com。

通信作者: 徐胜林 (1981—), 男, 博士, 副教授, 沉积学专业。E-mail: xusheng218@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (41602107) 和成都理工大学中青年骨干教师培养计划 (JXGG201537, JXGG201538) 资助。

中二叠统栖霞组沉积期四川盆地整体上表现为以碳酸盐岩沉积为特征,诸多学者对其古地理格局和沉积—构造演化等方面开展了大量研究^[1-7]。刘治成等^[4]对四川盆地华蓥溪口地区栖霞组沉积期微生物灰泥丘的研究,反映该时期的沉积古环境特征及微生物对环境具有影响;梁文君等^[5]通过对川西北地区中二叠统微量、常量元素的分析,研究了该时期的古气候和氧化还原条件等问题;陈洪德等^[3]通过对南方不同海相中二叠统进行系统的层序地层划分与对比,将栖霞组划分为3个Ⅱ型层序;冯增昭等^[6]将四川盆地中二叠统栖霞组的沉积特征定义为碳酸盐岩台地沉积;胡明毅等^[7]通过对四川盆地碳酸盐岩的研究,将栖霞组划分为2个Ⅱ型层序,同时将四川盆地中二叠统沉积特征定义为浅水碳酸盐岩台地。本文在充分调研前人研究成果的基础上,以川东北旺苍地区鹿渡坝剖面栖霞组为研究对象,开展碳氧同位素、主量元素和微量元素的分析,揭示研究区栖霞组沉积期的古水深、古盐度、古气候和氧化还原条件等信息,以期为后续研究提供新的地质依据。

1 地质概况

研究区位于四川盆地北缘,构造上属于上扬子准地台北部,米仓山推覆构造南缘滑脱带,北侧为米仓山推覆隆起带,南侧为四川盆地北缘拗陷^[8](图1)。鹿渡坝剖面栖霞组出露完整、连续,底部为中厚层状灰黑色含硅质微晶灰岩、深灰色含生屑微晶灰岩、深灰色钙质页岩互层,整段栖霞组富含古生物化石,底部为灰色泥晶灰岩、灰色泥晶生屑灰岩;局部可见“砂糖状”白云岩、瘤状构造,成层

性较好,古生物类型一般有腕足、腹足、珊瑚、有孔虫、海百合等。栖霞组与上覆茅口组和下伏下二叠统梁山组黄色泥岩均呈整合接触关系。

2 样品采集及分析方法

旺苍县鹿渡坝剖面栖霞组厚 92 m,野外根据岩石学特征及古生物特征将栖霞组自下而上划分为 24 层,且逐一进行采样,将其中 21 件代表性的样品进行地球化学分析(图 2)。采集岩样时,为降低成岩蚀变作用影响,选择岩性均匀的新鲜岩石部分,尽量避免在次生裂隙、风化、重结晶、方解石脉发育的部分采集样品,同时详细记录其产状,并使用放大镜及浓度 5% 的盐酸初步确定了岩性。

进行地球化学分析样品的加工及测试均在青岛斯巴达分析测试有限公司完成。首先将样品无污染粉碎至 200 目干燥,用磷酸法制成 CO₂ 气体,在 Delta V Advantage 同位素质谱仪进行检测,采用 PDB 国际标准,分析精度为 ±0.2‰。全岩主量元素采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)进行测试,仪器型号为 IRIS Intrepid II XSP,偏差小于 1%。微量元素与稀土元素在电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)进行测试,仪器为 PE 公司 ELAN 9000 型,偏差小于 1%。

3 地球化学

3.1 数据有效性

后期成岩蚀变和白云岩化作用可能对本文数据分析有所影响,因此需要对鹿渡坝剖面所采集的全部碳酸盐岩样品进行有效性评价。DERRY 等^[9]通过大量的实验数据总结出, MgO/CaO < 0.125,

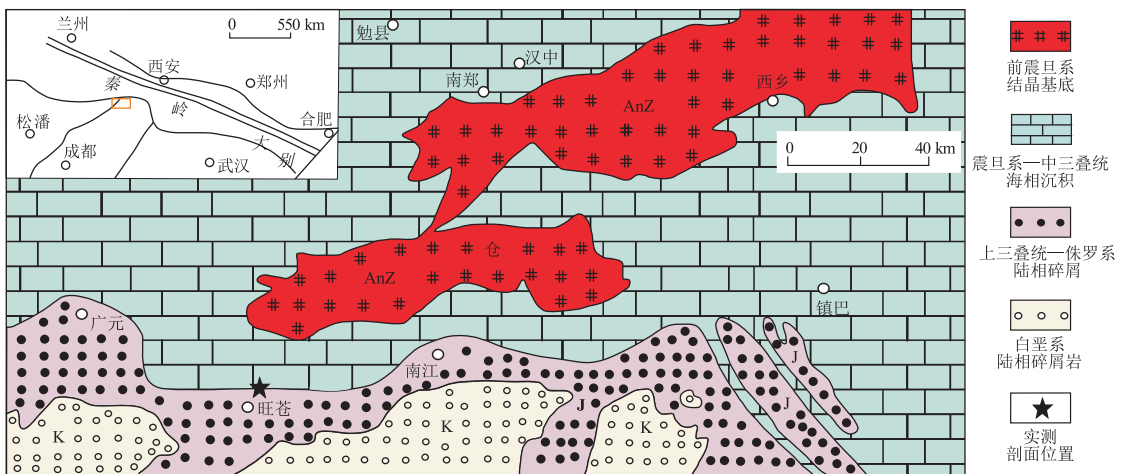


图1 川东北旺苍地区地质简图及剖面位置

据文献[2,8]修改。

Fig.1 Schematic geological map and profile location in Wangcang, northeastern Sichuan

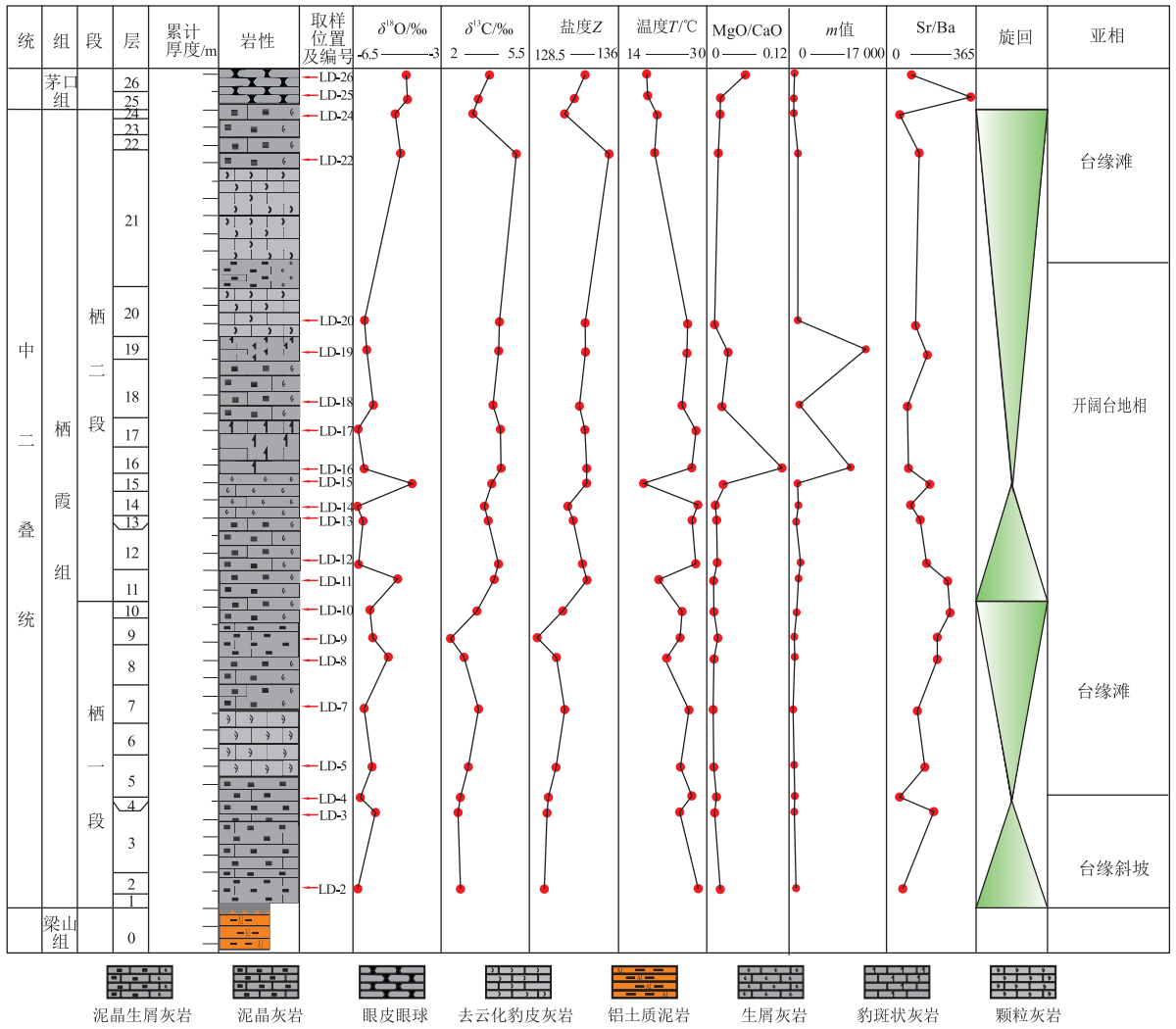


图 2 川东北旺苍县鹿渡坝剖面栖霞组取样位置及部分元素含量变化

Fig.2 Sampling location and element contents of Qixia Formation in Luduba profile, Wanggang, northeastern Sichuan

Mn/Sr ≤ 0.6, Fe/Sr < 3 是判断碳酸盐岩未发生白云岩化的指标,文中指出这个指标带有一定的经验性。KAUFMAN 等^[10] 提出当碳酸盐岩 δ¹⁸O_{PDB} < -10‰ 时,岩石已经发生了强烈的蚀变。许多学者通过对 δ¹⁸O 与 δ¹³C 的相关性研究,发现两者的正相关性越强,体现出岩石受到成岩作用影响越强。若 δ¹⁸O 与 δ¹³C 表现为离散特性,则说明岩石碳、氧同位素未受到成岩蚀变的影响,能够反映其沉积环境。本文通过结合以上 2 种对数据有效性判断的指标,对实验数据进行筛选。

栖霞组样品 LD-1 和 LD-17 的 MgO/CaO 比值均大于 0.125,前者比值为 0.208,后者比值为 0.133。LD-1 为灰黑色—深灰色中层状细晶灰岩,该层较薄,且与下伏梁山组黄色泥页岩整合接触,导致样品可能发生污染,为了真实反映原始沉积环境,故舍弃;LD-17 野外观察为中厚层状豹斑状白云岩,白云岩化作用明显,也剔除;其余 19 件样品 MgO/CaO 比值均小于 0.125,介于 0.07 ~ 0.103 之

间,且均满足 Fe/Sr < 3, Mn/Sr ≤ 0.6, δ¹⁸O_{PDB} > -10‰。δ¹⁸O_{PDB} 介于 -6.366‰ ~ -3.991‰, δ¹³C_{PDB} 介于 2.3‰ ~ 5.0‰, δ¹⁸O 与 δ¹³C 表现离散特性(图 3),满足数据有效性分析,故可用于古环境分析。

3.2 碳、氧同位素组成特征

从样品碳氧同位素分析结果(图 2)来看,鹿渡

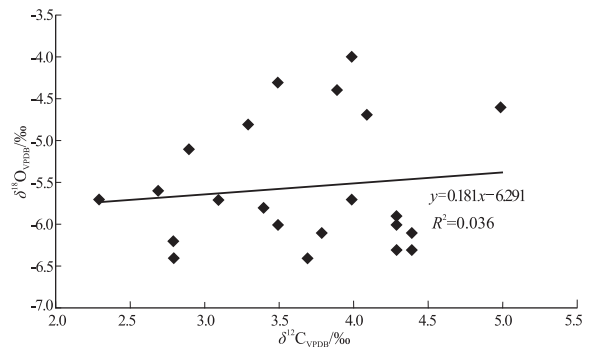


图 3 川东北旺苍县鹿渡坝剖面栖霞组碳、氧同位素相关性
Fig.3 Correlation of stable carbon and oxygen isotopes of Qixia Formation in Luduba profile, Wanggang, northeastern Sichuan

表 1 川东北旺苍县鹿渡坝剖面栖霞组碳酸盐岩部分微量元素分析结果
Table 1 Major element data for carbonate rocks in Qixia Formation in Luduba profile, Wangcang, northeastern Sichuan

样号	主量元素质量分数/%						LOI/%	MgO/CaO	m	Σ(CaO+MgO+LOI)	Σ(Al ₂ O ₃ +TiO ₂)
	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	TiO ₂					
LD-2	0.082	52.30	0.169	0.020	0.970	0.004	42.97	0.019	1 183	96.24	0.085
LD-3	0.106	51.82	0.163	0.030	0.444	0.006	42.75	0.009	419	95.01	0.112
LD-4	1.690	44.46	0.232	0.452	0.529	0.063	39.43	0.012	31	84.42	1.752
LD-5	0.340	48.67	0.160	0.069	0.400	0.015	43.02	0.008	118	92.09	0.354
LD-7	0.097	49.61	0.146	0.020	0.358	0.005	43.28	0.007	369	93.25	0.102
LD-8	0.044	48.77	0.161	0.020	0.398	0.003	42.90	0.008	905	92.07	0.047
LD-9	0.199	53.94	0.181	0.050	0.915	0.013	43.30	0.017	460	98.16	0.212
LD-10	0.031	50.79	0.146	0.010	0.388	0.001	43.04	0.008	1 252	94.22	0.032
LD-11	0.027	50.35	0.152	0.010	0.437	0.002	42.23	0.009	1 619	93.02	0.029
LD-12	0.032	51.08	0.154	0.010	0.763	0.001	41.86	0.015	2 384	93.70	0.033
LD-13	0.054	51.68	0.162	0.010	0.662	0.003	42.65	0.013	1 226	94.99	0.057
LD-14	0.030	52.28	0.165	0.010	0.517	0.001	40.76	0.010	1 723	93.56	0.031
LD-15	0.119	51.47	0.171	0.020	1.180	0.008	42.64	0.023	992	95.28	0.127
LD-16	0.039	47.92	0.162	0.010	4.960	0.002	43.59	0.103	1 2718	96.47	0.041
LD-18	0.067	53.45	0.174	0.020	1.020	0.003	41.83	0.019	1 522	96.30	0.070
LD-19	0.010	49.60	0.154	0.001	1.450	0.001	41.36	0.029	14 500	92.42	0.010
LD-20	0.041	54.34	0.177	0.001	0.531	0.003	40.39	0.010	1 295	95.26	0.044
LD-22	0.048	53.29	0.166	0.002	0.833	0.003	43.66	0.016	1 735	97.78	0.051
LD-24	0.851	49.52	0.252	0.301	0.792	0.032	42.11	0.016	93	92.43	0.883
LD-25	0.163	51.88	0.18	0.030	0.909	0.007	42.90	0.018	558	95.69	0.170
LD-26	0.327	45.65	0.179	0.050	2.330	0.014	40.20	0.051	713	88.18	0.341

注:m=100×(MgO/Al₂O₃);LOI为烧失量。

坝剖面栖霞组碳酸盐岩的 δ¹³C 值介于 2.3‰ ~ 4.4‰ 之间,与 VEIZER^[11] 给出的海相石灰岩的 δ¹³C 值域 -5.0‰ ~ 5.0‰ 相符;δ¹⁸O 值在 -6.4‰ ~ -4.0‰ 之间变化,近于正常海相碳酸盐岩的 δ¹⁸O 值域 -10‰ ~ -2‰。该剖面自下而上,整体上 δ¹⁸O 变化呈现正偏移,且具有一定的变化规律;2 层到 8 层表现为正偏移,8 层到 13 层表现为负偏移,13 层到 24 层表现为正偏移(图 2)。这些局部变化幅度的差别,对整体有一定的影响。

3.3 主量元素特征

19 件样品主量元素(表 1)有以下特征:

(1)CaO 平均值为 50.81%,介于 44.46% ~ 54.34% 之间,接近于纯灰岩化学成分理论值 56%^[12], Σ(CaO+MgO+LOI) 平均值为 94.03%,反映了稳定的沉积环境,白云岩化对岩石的改造作用较小,不影响数据的分析。(2)陆源元素 Al₂O₃ 与 TiO₂ 含量很低,且强烈正相关(r=0.966),前者平均值为 0.128%,后者平均值为 0.006%;Al₂O₃ 含量低于碳酸盐岩中的平均含量 0.4%^[13]。由此可见,研究区碳酸盐岩沉积环境为离陆较远、较深水的古海洋环境。垂向上,Al₂O₃ 与 TiO₂ 的含量与水深的阶段性相对应,TiO₂ 与 Fe₂O₃、K₂O 含量成正相关性

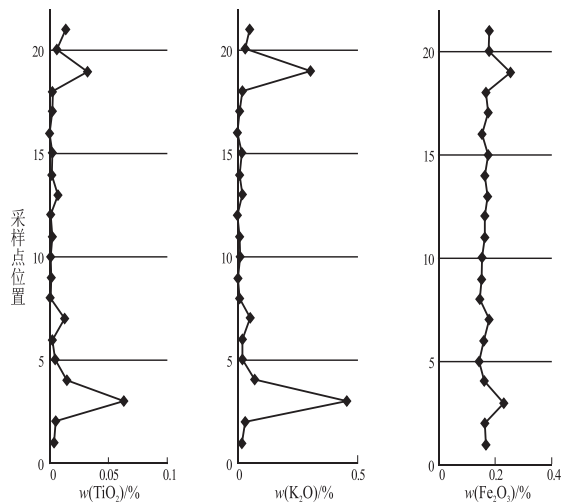


图 4 川东北旺苍县鹿渡坝剖面栖霞组主量元素 TiO₂ 与 Fe₂O₃、K₂O 相关性

Fig.4 Correlation of TiO₂, Fe₂O₃ and K₂O of Qixia Formation in Luduba profile, Wangcang, northeastern Sichuan

(图 4),由底至顶 Σ(Al₂O₃+TiO₂) 的变化趋势与栖霞组海水深度变化相一致,说明栖霞组的沉积过程中,水深的变化决定着陆源物质的供给。

3.4 稀土元素特征

研究区栖霞组稀土总量(REE)较低,介于(0.71~44.91)×10⁻⁶,平均值为 5.45×10⁻⁶,符合碳酸盐岩稀

表 2 川东北旺苍县鹿渡坝剖面栖霞组部分稀土元素分析果结

Table 2 Rare earth elements analysis of Qixia Formation in Luduba profile, Wangcang, northeastern Sichuan

样号	稀土元素质量分数/ 10^{-6}											δCe	$\Sigma LREE/\Sigma HREE$
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	Tb	Dy	Er	Yb	ΣREE		
LD-2	2.450	4.299	0.606	2.517	0.480	0.579	0.088	0.517	0.286	0.229	12.359	0.768	6.09
LD-3	1.385	2.583	0.298	1.228	0.261	0.260	0.038	0.238	0.138	0.121	6.690	0.874	7.24
LD-4	9.659	18.948	2.074	7.898	1.611	1.416	0.218	1.109	0.627	0.654	44.907	0.920	9.99
LD-5	1.531	3.082	0.356	1.347	0.239	0.257	0.034	0.187	0.132	0.135	7.437	0.909	8.80
LD-7	0.634	1.060	0.136	0.530	0.107	0.126	0.016	0.073	0.077	0.064	2.867	0.783	6.93
LD-8	0.276	0.441	0.062	0.241	0.041	0.053	0.009	0.080	0.080	0.079	1.388	0.734	3.52
LD-9	0.630	1.275	0.148	0.533	0.093	0.089	0.014	0.071	0.056	0.062	3.012	0.909	9.17
LD-10	0.241	0.421	0.036	0.172	0.040	0.037	0.004	0.022	0.022	0.027	1.022	0.950	8.13
LD-11	0.174	0.329	0.029	0.127	0.034	0.031	0.004	0.035	0.026	0.034	0.823	0.988	5.33
LD-12	0.208	0.417	0.044	0.194	0.023	0.039	0.004	0.016	0.022	0.018	0.985	0.943	8.95
LD-13	0.259	0.477	0.046	0.193	0.036	0.036	0.006	0.027	0.019	0.021	1.120	0.935	9.28
LD-14	0.227	0.431	0.044	0.170	0.035	0.030	0.003	0.030	0.017	0.011	0.998	0.935	9.97
LD-15	0.530	0.954	0.113	0.454	0.104	0.110	0.015	0.101	0.061	0.053	2.519	0.849	6.34
LD-16	0.253	0.486	0.052	0.150	0.021	0.046	0.005	0.030	0.025	0.024	1.091	0.921	7.40
LD-18	0.718	1.392	0.149	0.589	0.126	0.131	0.017	0.094	0.070	0.056	3.363	0.923	8.08
LD-19	0.195	0.320	0.041	0.111	0.028	0.015	0.002	0.011	0.013	0.004	0.740	0.780	15.44
LD-20	0.386	0.666	0.071	0.241	0.045	0.048	0.006	0.037	0.037	0.031	1.566	0.867	8.86
LD-22	0.544	0.957	0.108	0.397	0.102	0.094	0.016	0.085	0.062	0.056	2.419	0.856	6.73
LD-24	3.153	4.306	0.649	2.442	0.490	0.469	0.068	0.379	0.212	0.209	12.610	0.653	8.26
LD-25	0.709	1.175	0.139	0.567	0.112	0.151	0.022	0.116	0.074	0.070	3.206	0.809	6.24
LD-26	0.741	1.347	0.172	0.557	0.108	0.144	0.021	0.121	0.089	0.083	3.467	0.822	6.39

土总量小于 100×10^{-6} 的特征; LD-4 稀土总量 (REE) 异常高, 为 44.91×10^{-6} , 其各项稀土元素的指标均高。元素 Eu、Ho、Tm、Lu 测量的质量分数值小于 0.01×10^{-6} , 含量太低不予考虑。 $\Sigma LREE/\Sigma HREE$ 平均值为 7.96, 轻稀土元素相对重稀土元素富集, δCe 值介于 0.653~0.988, 呈弱负异常 (表 2)。 ΣREE 与陆源元素 ($Al_2O_3+TiO_2$) 呈强烈的正相关。所测的稀土元素与北美页岩标准化稀土配分曲线对比, 表现为近似水平 (图 5), 但各曲线稀土元素总量和分配模式存在差异, 表明栖霞组各阶段陆源物质的供给及沉积环境具有一定的差异性。所测样品的稀土含量较为稳定, 显示沉积时受物源影响较小。

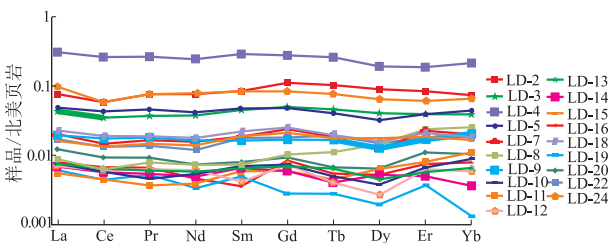


图 5 东北旺苍县鹿渡坝剖面栖霞组碳酸盐岩稀土元素北美页岩标准化配分模式

Fig.5 NASC-normalized REE patterns for carbonate rocks of Qixia Formation in Luduba profile, Wangcang, northeastern Sichuan

4 古环境分析

4.1 氧化还原条件

研究发现沉积物中具有能够指示水介质的氧化—还原条件元素 (如 U、V 和 Mo 等), 利用这些元素在岩石中的响应, 便于推断在其古环境的氧化—还原特征^[6]。TRIBOVILLARD 等^[14]指出, U、V 和 Mo 可作为判断古环境氧化还原条件的有效判别指标, 依次为 Cr 和 Co。U/Th 作为良好的氧化—还原判别指标, 一般认为大于 0.5 为还原环境。HATCH 等^[15]与 THOMAS 等^[16]通过对泥岩古氧化还原条件分析, 进一步指出水体的氧化—还原环境与 $V/(V+Ni)$ 比值有关, 并给出其比值代表的氧化—还原环境: 高 $V/(V+Ni)$ 比值 (0.84~0.89) 反映缺氧环境; 中等 $V/(V+Ni)$ 比值 (0.54~0.82) 指示不强烈的缺氧环境; 偏中等 $V/(V+Ni)$ 比值 (0.46~0.60) 为贫氧环境; 低 $V/(V+Ni)$ 比值则为富氧环境。颜佳新等^[17]和施春华等^[18]分别对不同地区栖霞组研究, 证实该泥岩古氧化还原条件分析的方法对碳酸盐岩同样适用。

研究区栖霞组碳酸盐岩 U/Th 分布范围在 2~119, $V/(V+Ni)$ 分布范围在 0.34~0.90 之间, 整体上栖霞组碳酸盐岩处于缺氧—贫氧环境。样品 LD-12、

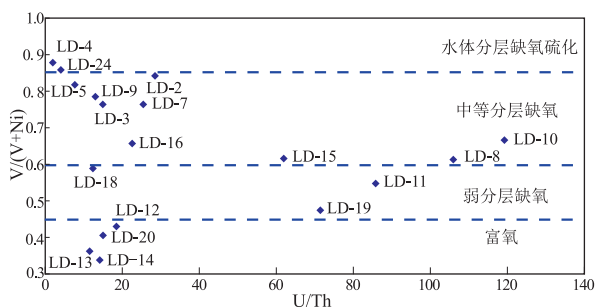


图6 川东北旺苍县鹿渡坝剖面栖霞组氧化还原环境 $U/Th-V/(V+Ni)$ 判别图解
据文献[1,15]。

Fig.6 Cross plots of redox indices U/Th vs. $V/(V+Ni)$ of Qixia Formation in Luduba profile, Wangcang, northeastern Sichuan

LD-13 和 LD-14 所处的层位处于栖霞组中期,为富氧环境;LD-2、LD-4 和 LD-24 均表现为高 $V/(V+Ni)$ 值(>0.6),呈厌氧沉积环境(图6)。栖霞组生物类型多为腕足类,这些生物对水体含氧量需求不高,从而栖霞组这种复杂多变的沉积环境,符合沉积学证据;其次与海平面小范围内震荡性、周期性的变化有着密切的联系。

4.2 古气候与古环境

4.2.1 古水深

前人通过对各种元素的研究与验证,得出较为准确的方法来反映古气候与古环境;Sr 和 Ba 溶解度的不同,决定了在堆积位置的不同。Ba 化合物的溶解度比 Sr 化合物溶解度低,Ba 更容易在近岸堆积。另外,就迁移速度而言,元素 Sr 迁移速度大于元素 Ba,使得海水盐度增加时元素 Ba 首先沉淀,因此通过 Sr/Ba 值可对盐度进行判别。Sr/Ba >1 时,代表海相沉积环境;Sr/Ba <1 时,代表陆相沉积环境^[19]。

栖霞组样品 Sr/Ba 分布于 21.9~261.9 之间(图2),平均值为 137.1。栖霞组沉积早期,Sr/Ba 比值持续升高,推测由于早期持续的海侵造成的水体加深,岩性上表现为灰黑色泥晶灰岩为主;栖霞组沉积中期到晚期阶段,Sr/Ba 比值总体较低,大体呈下降趋势,反映沉积水体再次变浅的过程,岩性上表现为灰色泥晶灰岩、灰色泥晶生屑灰岩和含白云质灰岩等,经历 2 个旋回,可以识别出 2 个 II 型层序界面;而在栖霞组沉积晚期与茅口组沉积早期之间存在着又一次水体由浅到深的变化趋势,岩性上表现为突出的“眼皮眼球状灰岩”(图2)。

4.2.2 古盐度

沉积岩中镁铝含量对沉积环境对比具有重要的标志作用。实验发现,镁为亲海性元素,铝为亲

陆性元素,可通过建立公式 $m = 100 \times MgO/Al_2O_3$ 对比海相或陆相沉积环境; $m < 1$ 时为淡水环境; $1 < m < 10$ 时为海陆过渡环境; $10 < m < 500$ 时为海相沉积环境; $m > 500$ 时为陆表海或潟湖碳酸盐岩沉积环境^[20]。

研究区 m 值分布的差异较大,介于 90~15 000 之间(表1),整体上属海相沉积环境。通过数据在各层位表现可以看出,栖霞一段整体上 $m < 500$,处于海相沉积环境;栖霞二段整体上 $m > 1 200$,为陆表海碳酸盐岩沉积环境;中间 15 层 m 值突降为 994,而 9 层的 $m < 500$,该 2 层古盐度的突降,也说明其古水深变浅,同时说明栖霞二段海水呈一定范围内的震荡变化。栖霞二段沉积晚期 $m = 93$,与茅口组沉积早期 $m > 500$ 有差异,但也有继承性,说明栖霞组沉积晚期水体相对较浅,茅口组沉积早期是一个水体加深的过程。

KEITH 等^[21]发现,自寒武纪以来 $\delta^{13}C$ 值不会发生太大的变化,用 $\delta^{13}C$ 的原始数据直接计算当时的古盐度是可行的,同时建立 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 之间的关系,确立碳酸盐岩盐度的经验公式: $Z = 2.048(\delta^{13}C + 50) + 0.498(\delta^{18}O + 50)$,其中 $\delta^{13}C$ 值及 $\delta^{18}O$ 值均为 PDB 标准。当古盐度标准值 $Z > 120$ 时,为海相碳酸盐岩;当 $Z < 120$ 时,为淡水碳酸盐岩。

研究区栖霞组古盐度 Z 值介于 129.07~135.21(图2),均大于 120,所以鹿渡坝地区整个栖霞组为海相碳酸盐岩。整体上,鹿渡坝剖面各期的 Z 值变化曲线与其对应的碳同位素变化曲线变化相似(图2),垂向上,由底至顶,整体表现出 Z 值逐渐增高,阶段性变化明显,反映出在碳酸盐岩沉积期,盐度的变化为栖霞二段较栖霞一段明显升高。栖霞二段沉积末期盐度有所下降,从趋势看,茅口组沉积早期盐度上升。

4.2.3 古水温

一般来说,年代越老,受成岩作用改造越强烈, $\delta^{18}O$ 值偏离也越大,这种效应被称为“年代效应”^[22]。年代效应将会影响古温度测定的可靠性,在这种情况下,就要进行“年代效应”校正。本文研究的样品,用 KEITH 等^[21]给出的 $\delta^{18}O$ 值与地质年代的关系进行“年代效应”校正,然后再进行古温度的计算。

$$T = 16.9 - 4.2(\delta^{18}O_{CaCO_3校正} + 0.22) + 0.13(\delta^{18}O_{CaCO_3校正} + 0.22)^2$$

研究区栖霞组古水温介于 17.62~28.43 °C(图2),在垂向上,温度整体表现为由底至顶变低:

栖一段表现为缓慢的下降,而栖二段早期为在一定变化范围内波动,栖二段晚期开始缓慢降低,茅口组早期温度相对回升。

4.2.4 古气候

MgO/CaO 比值对气候变化具有较好的指示作用,通常可以反映干热或潮湿的气候^[1]。鹿渡坝剖面样品整体上 MgO/CaO 比值低,且范围小,平均值为 0.013 6,介于 0.007~0.029,据此判断栖霞组沉积期为潮湿气候。根据李维波等^[23]二叠纪古板块再造图表示,二叠纪扬子陆块处于赤道附近,故而栖霞组沉积期为热带季风气候。在整个垂向剖面上,MgO/CaO 值变化呈先降低后再升高的变化趋势(图 2),LD-16 为数据异常点,造成数据异常的原因是在数据有效性判断时,MgO/CaO 值为 0.103(表 1),为相对高镁,但未发生白云岩化作用。仅一个点不能说明气候条件的真实变化,且其他点均在相对稳定的范围内,所以栖霞组沉积期气候条件比较稳定。

5 结论

(1)通过对比可反映古气候、古环境的特征值,说明研究区栖霞组处于离陆较远的海相沉积环境,经历 2 次水体加深。古水深在小范围内呈震荡式变化,在一定程度上为层序的划分提供辅助性的参照,栖霞组沉积中期的短暂水体变浅对层序界面的识别是有益的。

(2)研究区栖霞组沉积期整体上处于贫氧—缺氧环境,栖霞组古氧相变化规律呈缺氧硫化—中等分层缺氧—富氧—中等分层缺氧。栖霞组沉积中期表现为富氧环境,同时该时期也是海平面相对较低的阶段,这些地球化学分析符合沉积学特征。

(3)通过对古气候敏感性特征元素的分析,反映研究区栖霞组沉积时为潮湿、温暖的热带气候条件。整体上,鹿渡坝剖面栖霞组沉积期表现出稳定的热带季风潮湿性气候环境。

参考文献:

- [1] 田洋,赵小明,王令占,等.重庆石柱二叠纪栖霞组地球化学特征及其环境意义[J].沉积学报,2014,32(6):1035-1045.
TIAN Yang,ZHAO Xiaoming,WANG Lingzhan,et al.Geochemical characteristics and its paleoenvironmental implication of Permian Qixia Formation in Shizhu,Chongqing[J].Acta Sedimentologica Sinica,2014,32(6):1035-1045.
- [2] 李小宁,黄思静,黄树光,等.四川盆地南江栖霞组白云岩岩石学、地球化学特征及成因[J].石油实验地质,2016,38(2):251-258.
LI Xiaoning,HUANG Sijing,HUANG Shuguang,et al.Petrologic and geochemical characteristics and the origin of dolomites in the Qixia Formation in Nanjiang county of the Sichuan Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2016,38(2):251-258.
- [3] 陈洪德,覃建雄,王成善,等.中国南方二叠纪层序岩相古地理特征及演化[J].沉积学报,1999,17(4):510-521.
CHEN Hongde,QIN Jianxiong,WANG Chengshan,et al.Sequence-based lithofacies and paleogeographic characteristics and evolution of Permian in South China[J].Acta Sedimentologica Sinica,1999,17(4):510-521.
- [4] 刘治成,杨巍,王炜,等.四川盆地中二叠世栖霞期微生物丘及其对沉积环境的启示[J].中国地质,2015,42(4):1009-1023.
LIU Zhicheng,YANG Wei,WANG Wei,et al.The microbial mud mound of the Middle Permian Qixia period in Sichuan Basin and its indication significance to sedimentary environment[J].Geology in China,2015,42(4):1009-1023.
- [5] 梁文君,肖传桃,肖胜.川西地区中二叠世—中三叠世微量、常量元素与古环境、古气候关系研究[J].科学技术与工程,2015,15(11):14-24.
LIANG Wenjun,XIAO Chuantao,XIAO Sheng.Study on relationships between paleoenvironment,paleoclimate of Middle Permian—Middle Triassic and constant,trace elements in western Sichuan[J].Science Technology and Engineering,2015,15(11):14-24.
- [6] 冯增昭,杨玉卿,金振奎,等.中国南方二叠纪岩相古地理[J].沉积学报,1996,14(2):1-11.
FENG Zengzhao,YANG Yuqing,JIN Zhenkui,et al.Lithofacies paleogeography of the Permian of South China[J].Acta Sedimentologica Sinica,1996,14(2):1-11.
- [7] 胡明毅,魏国齐,胡忠贵,等.四川盆地中二叠统栖霞组层序—岩相古地理[J].古地理学报,2010,12(5):515-526.
HU Mingyi,WEI Guoqi,HU Zhonggui,et al.Sequence—lithofacies palaeogeography of the middle Permian Qixia Formation in Sichuan Basin[J].Journal of Palaeogeography,2010,12(5):515-526.
- [8] 魏显贵,杜思清,刘援朝,等.米仓山推覆构造的结构样式及演化特征[J].矿物岩石,1997,17(S1):117-125.
WEI Xiangui,DU Siqing,LIU Yuanchao,et al.Tectonic styles and evolution of Micangshan Nappe Tectonics[J].Journal of Mineralogy and Petrology,1997,17(S1):117-125.
- [9] DERRY L A,BRASIER M D,CORFIELD R M,et al.Sr and C isotopes in Lower Cambrian carbonates from the Siberian craton: A paleo-environmental record during the ‘Cambrian explosion’[J].Earth and Planetary Science Letters,1994,128(3/4):671-681.
- [10] KAUFMAN A J,KNOLL A H.Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: Stratigraphic and biogeochemical implications[J].Precambrian Research,1995,73(1/4):27-49.
- [11] QING H R,VEIZER J.Oxygen and carbon isotopic composition of Ordovician brachiopods: Implications for coeval seawater[J].Geochimica et Cosmochimica Acta,1994,58(20):4429-4442.
- [12] VEIZER J,DEMOVIC R.Strontium as a tool in facies analysis[J].Journal of Sedimentary Research,1974,44(1):93-115.
- [13] ROBISON R A,ROWELL A J A.Potential series boundary within the Cambrian[J].Int Geol Congr,1980,26:279.

- [14] 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.
- [15] HATCH J R, LEVENTHAL J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U.S.A [J]. *Chemical Geology*, 1992, 99(1/3): 65-82.
- [16] ALGEO T J, MAYNARD J B. Trace-element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothems [J]. *Chemical Geology*, 2004, 206(3/4): 289-318.
- [17] 颜佳新, 徐四平, 李方林. 湖北巴东栖霞组缺氧沉积环境的地球化学特征 [J]. *岩相古地理*, 1998, 18(6): 27-32.
YAN Jiaxin, XU Siping, LI Fanglin. Geochemistry of the dysaerobic sedimentary environments of the Qixia Formation in Badong, Hubei [J]. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 1998, 18(6): 27-32.
- [18] 施春华, 黄秋, 颜佳新. 广西来宾栖霞组缺氧沉积环境的地球化学特征 [J]. *沉积与特提斯地质*, 2001, 21(2): 72-77.
SHI Chunhua, HUANG Qiu, YAN Jiaxin. Geochemistry of the dysaerobic sedimentary environments of the Qixia Formation in Laibing, Guangxi [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2001, 21(2): 72-77.
- [19] 经雅丽, 张克信, 林启祥, 等. 浙江长兴煤山下三叠统和龙山组、南陵湖组沉积地球化学特征与古环境意义 [J]. *地质科技情报*, 2005, 24(1): 35-40.
JING Yali, ZHANG Kexin, LIN Qixiang, et al. Sedimentary geochemistry characteristics and paleoenvironmental meaning of Helongshan Formation and Nanlinghu Formation in Meishan, Changxing county, Zhejiang Province [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2005, 24(1): 35-40.
- [20] MACKENZIE F T. Sedimentary cycling and the evolution of seawater [C] // RILEY J P, SKIRROW G. *Chemical Oceanography*. 2nd ed. Dublin: Academic Press, 1975: 309-364.
- [21] KEITH M L, WEBER J N. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, 28(10/11): 1787-1816.
- [22] 邵龙义. 碳酸盐岩氧、碳同位素与古温度等的关系 [J]. *中国矿业大学学报*, 1994, 23(1): 39-45.
SHAO Longyi. The relation of the oxygen and carbon isotope in the carbonate rocks to the paleotemperature etc [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1994, 23(1): 39-45.
- [23] 李维波, 李江海, 王洪浩, 等. 二叠纪古板块再造与岩相古地理特征分析 [J]. *中国地质*, 2015, 42(2): 685-694.
LI Weibo, LI Jianghai, WANG Honghao, et al. Characteristics of the reconstruction of Permian paleoplate and lithofacies paleogeography [J]. *Geology in China*, 2015, 42(2): 685-694.
- (编辑 徐文明)
- ~~~~~
- (上接第 209 页)
- [37] DING Xiujian, LIU Guangdi, ZHA Ming, et al. Relationship between total organic carbon content and sedimentation rate in ancient lacustrine sediments, a case study of Erlan Basin, Northern China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, 149: 22-29.
- [38] BOHACS K M, CARROLL A R, NEAL J E, et al. Lake-basin type, source potential, and hydrocarbon character: An integrated sequence-stratigraphic geochemical framework [M] // GIERLOWSKI-KORDESCH E H, KELTS K R. *Lake basins through space and time*. Tulsa: AAPG, 2000: 3-33.
- [39] BOHACS K M, CARROLL A R, NEAL J E. Lessons from large lake systems: thresholds, nonlinearity, and strange attractors [R]. Boulder, Colorado: Geological Society of America, 2003: 75-90.
- [40] IBACH L E J. Relationship between sedimentation rate and total organic carbon content in ancient marine sediments [J]. *AAPG Bulletin*, 1982, 66(2): 170-188.
- [41] 谢树成, 殷鸿福, 解习农, 等. 地球生物学方法与海相优质烃源岩形成过程的正演和评价 [J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2007, 32(6): 727-740.
XIE Shucheng, YIN Hongfu, XIE Xinong, et al. On the geobiological evaluation of hydrocarbon source rocks [J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2007, 32(6): 727-740.
- [42] 廖志伟, 陈洪德, 陈安清, 等. 鄂尔多斯盆地南部二叠系山西组二段泥岩稀土元素特征及地质意义 [J]. *石油天然气学报*, 2011, 33(9): 7-12.
LIAO Zhiwei, CHEN Hongde, CHEN Anqing, et al. The characteristics and geological implications of rare earth elements in mudstone of Permian P₁sh₂ in the southern Ordos Basin [J]. *Journal of Oil & Gas Technology*, 2011, 33(9): 7-12.
- [43] 胡俊杰, 李琦, 方念乔, 等. 藏北羌塘盆地中央隆起带下二叠统展金组沉积岩稀土元素地球化学特征及其地质意义 [J]. *古地理学报*, 2014, 16(6): 926-934.
HU Junjie, LI Qi, FANG Nianqiao, et al. REE geochemical characteristics and geological significance of sedimentary rocks of the Lower Permian Zhanjin Formation in central uplift zone of Qiangtang Basin, northern Tibet Plateau [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 16(6): 926-934.
- [44] JOHANNESSON K H, LYONS W B, BIRD D A. Rare earth element concentrations and speciation in alkaline lakes from the western U.S.A [J]. *Geophysical Research Letters*, 1994, 21(9): 773-776.
- (编辑 黄娟)