

川东南地区寒武系洗象池组碳、氧同位素特征及其意义 ——以贵州吼滩剖面为例

李笑天¹, 郭艳波², 梁金同^{1,3}, 罗鑫², 刘四兵⁴, 徐娟², 叶朝阳²

1. 成都理工大学 沉积地质研究院, 成都 610059; 2. 中国石油西南油气田分公司 重庆气矿, 重庆 400021;
3. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室(成都理工大学), 成都 610059;
4. 成都理工大学 能源学院(页岩气现代产业学院), 成都 610059

[摘要] 川东南地区寒武系洗象池组碳酸盐岩普遍发生白云石化, 且缺乏生物化石, 长期以来在地层对比与划分方面未形成统一认识。本研究在野外剖面和岩石学特征观察分析的基础上, 对川东南地区中—上寒武统洗象池组 41 个碳酸盐岩样品进行了碳、氧同位素分析。结果显示, 研究区洗象池组以泥晶—细粉晶白云岩为主, 含少量残余砂屑白云岩、粗粉—细晶白云岩; 样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布在 -11.05% ~ -8.29% 范围, 平均为 -9.67% , $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 -2.29% ~ 1.36% 之间, 平均为 -0.73% , 且 $\delta^{18}\text{O}$ 值和 $\delta^{13}\text{C}$ 值无明显正相关性, 基本保留了同期海水的原生碳、氧同位素组成。分析表明, 中—晚寒武世洗象池期川东南地区整体处于海相环境, 其中中—晚期盐度相对早期盐度整体略微升高, 海水温度分布在 $15.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $27.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 属于温暖或炎热的亚热带气候。SPICE (steptoean positive carbon isotope excursion) 事件在吼滩剖面有很好的可对比性, 可与全球其他地区进行对比, 反映一次全球范围的海退事件。此外, 通过对比川东南地区吼滩剖面与太和 1 井和渝东北地区利 1 井的碳同位素特征, 认为渝东北地区盐度相对川东南地区较高, 洗象池期盐盆地由川东南向渝东北演化, 对于寻找盐类矿床和油气地质具有重要意义。

[关键词] 川东南地区; 洗象池组; 碳、氧同位素; 古环境; 地层对比

[分类号] P597

[文献标志码] A

Characteristics and significance of carbon and oxygen isotopes of the Cambrian Xixiangchi Formation in southeastern Sichuan Basin: A case study from the Houtan section in Guizhou

LI Xiaotian¹, GUO Yanbo², LIANG Jintong^{1,3}, LUO Xin²,
LIU Sibing⁴, XU Xu², YE Chaoyang²

[收稿日期] 2023-06-25。

[基金项目] 国家自然科学基金青年项目(42202191); 中石油西南油气田分公司重庆气矿科研项目(XNS 重庆矿 JS2021-167); 四川省天然气成藏物质基础青年科技创新团队基金(2022JDTD0004)。

[第一作者] 李笑天(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 碳酸盐岩沉积学, E-mail: 438628646@qq.com。

[通信作者] 郭艳波(1987—), 男, 工程师, 研究方向: 综合地质研究, E-mail: guoyanb@petrochina.com.cn。

[引用格式] 李笑天, 郭艳波, 梁金同, 等, 2024. 川东南地区寒武系洗象池组碳、氧同位素特征及其意义——以贵州吼滩剖面为例[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(2): 210-222+246.

Li X T, Guo Y B, Liang J T, et al., 2024. Characteristics and significance of carbon and oxygen isotopes of the Cambrian Xixiangchi Formation in southeastern Sichuan Basin: A case study from the Houtan section in Guizhou[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(2): 210-222+246.

1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
2. Chongqing Gas District, PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Chongqing 400021, China;
3. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
4. College of Energy (College of Modern Shale Gas Industry), Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: The carbonates in the Cambrian Xixiangchi Formation in the southeastern Sichuan Basin have generally been dolomitized, and the lack of fossils from the area has long hindered a comprehensive understanding of its stratigraphic correlation and division. In this study, we used field observations as well as analyses of the profiles and petrological characteristics of the formation to examine carbon and oxygen isotopes in 41 carbonate samples from the Middle-Upper Cambrian Xixiangchi Formation in the southeastern Sichuan Basin. The results showed that the Xixiangchi Formation was mainly composed of micrite-fine silty crystalline dolomite, with a small amount of residual granular dolomite and coarse silty-finely crystalline dolomite. The $\delta^{18}\text{O}$ values of the samples were distributed in the range of -11.05% to -8.29% , with an average of -9.67% , while their $\delta^{13}\text{C}$ values were in the range of -2.29% and 1.36% , with an average of -0.73% . There was no significant positive correlation between the values of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$, and the original composition of the carbon and oxygen isotopes of seawater from the same period had been retained. The analysis showed that the southeastern Sichuan Basin had a marine environment in the Middle-Late Cambrian Xixiangchi period, and salinity in this period was slightly higher than that in the early period. The temperature of seawater in the Xixiangchi period ranged from $15.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $27.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, indicating that the study area had had a warm or hot subtropical climate. The stepoean positive carbon isotope excursion event in the Houtan section was comparable to such events in other areas of the world, reflecting a global regression event. In addition, a comparison of the characteristics of carbon isotopes of the Houtan section in the southeastern Sichuan Basin with those in the Taihe 1 and Li 1 wells in northeastern Chongqing showed that the latter had a higher salinity than the former. The salt basin evolved from southeastern Sichuan to northeastern Chongqing during the Xixiangchi period, which is important in the search for deposits of salt as well as oil and gas.

Key words: southeastern Sichuan Basin; Xixiangchi Formation; carbon and oxygen isotopes; paleoenvironment; stratigraphic correlation

近年来,随着四川盆地的油气勘探目标由中—浅层向深层—超深层转变,中国学者对四川盆地震旦系和寒武系地层的研究也越来越深入。研究表明,除震旦系灯影组及寒武系龙王庙组外,寒武系洗象池组(群)也具有良好的天然气勘探潜力(石书缘等,2020;文华国等,2022)。由于地层的划分与命名在四川盆地不同小区存在差异,寒武系第三统中上部—芙蓉统地层曾被不同学者命名为洗象池组(石书缘等,2020;文华国等,2022)、洗象池群(徐世琦等,2006;李伟等,2017)和娄山关群(江文剑等,2016;Hou et al.,2017)等,本研究将其统称为洗象池组。前人已围绕四川盆地洗象池组层序地层(井攀等,2016;贾鹏等,

2017a)、岩相古地理(谷明峰等,2020;文华国等,2022)、储层特征与成岩作用(林怡等,2017;李璐萍等,2022;Ren et al.,2022)等做了大量研究。其中,由于普遍的白云化作用以及生物化石缺乏,目前针对四川盆地洗象池组地层对比与划分方面的研究仍存在一定分歧。近年来,海相碳酸盐岩的稳定同位素的分析为解决这一问题提供了新思路,原因在于其组成能够近似地反映同时期古海洋同位素的组成,因此广泛应用于反映古海洋环境与划分对比地层(Kaufman and Knoll,1995;宋昊南等,2019)。

大量研究表明,在全球范围内寒武系第三统一芙蓉统界线处的碳酸盐岩层系中普遍记录了

一次显著的碳同位素正漂移事件,即 SPICE (steptoean positive carbon isotope excursion) 事件 (Saltzman et al., 1998; 左景勋等, 2008; Hammer and Svensen, 2017)。这一事件不仅可以用于洗象池组地层的划分与对比,还可以为古环境分析和与相关沉积矿产研究提供支撑(王淑丽等, 2016)。为此,笔者对川东南地区习水吼滩剖面的洗象池组地层进行了系统采样,基于详细的岩石学分析进行了碳、氧同位素研究,从而恢复了该地区洗象池期的古环境特征,同时也为研究区与全球其他地区寒武系第三统中上部一芙蓉统地层的对比提供了依据。此外,通过与盆地内其他地区碳同位素进行对比,还探讨了研究区蒸发盐盆地的沉积演化规律,对于寻找石盐及钾盐矿床和蒸发岩盖层具有重要意义。

1 区域地质背景

四川盆地是位于中上扬子克拉通内的一个大型含油气叠合盆地(Liu et al., 2021; 魏国齐等, 2018),其形成经历了包括晋宁、加里东、海西、印支、燕山和喜山等在内的多期构造运动。喜山期定型后,盆地边缘分别被多个构造带围限而整体呈菱形,面积约 $26.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地内部根据构造展布特点不同进一步划分为 6 个构造分区,即川西低缓断褶皱带、川北平缓断褶皱带、川西南低缓断褶皱带、川中平缓断褶皱带、川南低陡断褶皱带以及川东高陡断褶皱带。研究剖面位于四川盆地东南部,构造上属于川南低陡断褶皱带(图 1),东、西侧分别以华蓥山和龙泉山为界,整体发育低缓褶皱与断层等构造。

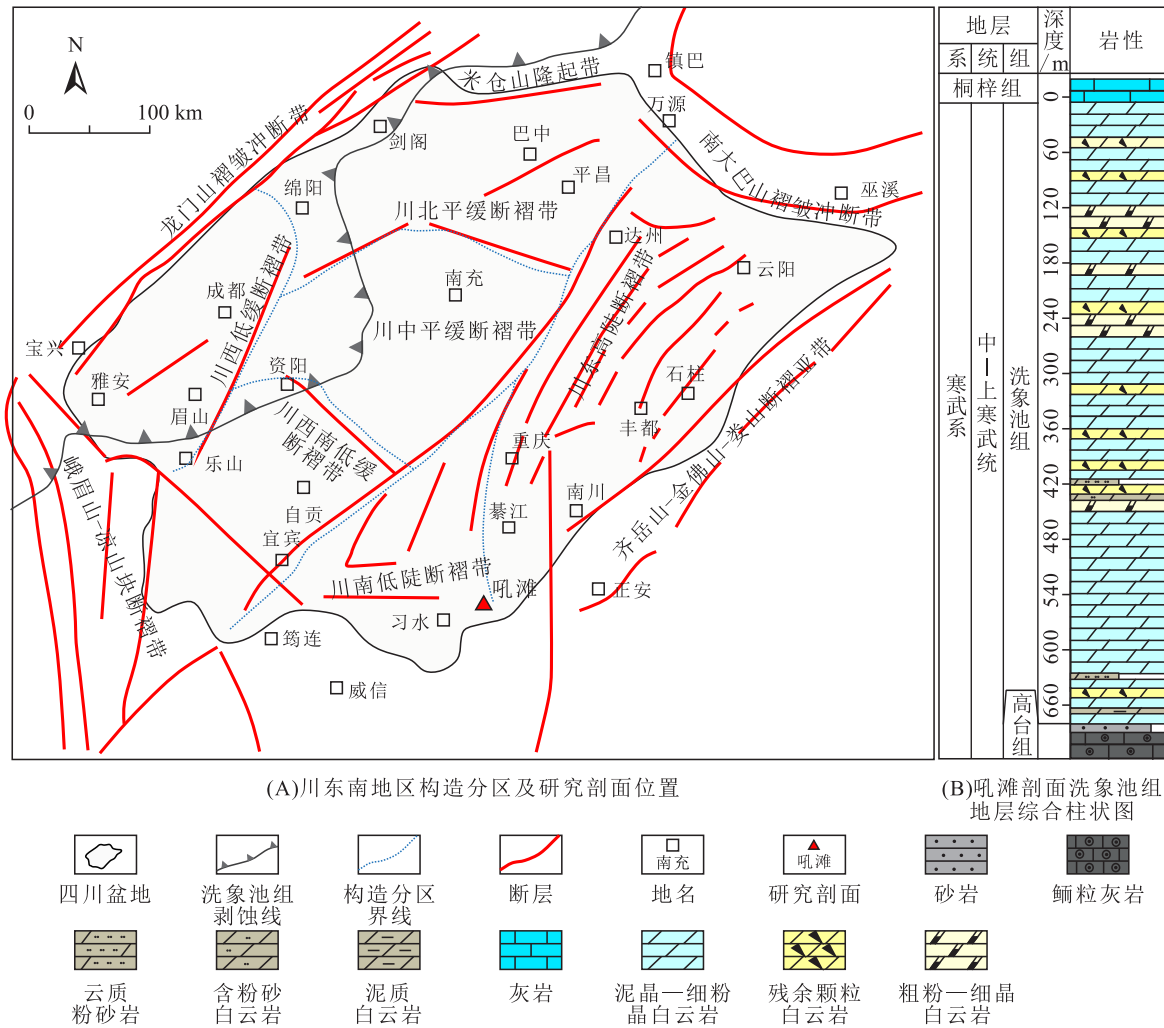


图 1 川东南地区地质背景(据李璐萍等, 2022)

Fig. 1 Geological settings of southeastern Sichuan Basin

四川盆地寒武系地层自下而上依次划分为筇竹寺组(C_{1q})、沧浪铺组(C_{1c})、龙王庙组(C_{1l})、高台组(C_{2g})和洗象池组(C_{2-3x})。中一晚寒武世洗象池期,四川盆地整体具西陆东海的沉积背景(冯增昭等,2002),同时受乐山—龙女寺古隆起的影响(张浩然等,2020),沉积地层总体上具西薄东厚的特征。川东南地区洗象池组地层发育相对完整,厚度介于200~900 m。洗象池期,四川盆地为碳酸盐台地沉积体系,除西侧发育混积潮坪外,整体以局限台地沉积为主。盆内洗象池组碳酸盐岩白云石化程度强,主要岩性为晶粒白云岩和残余颗粒白云岩(文华国等,2022)。

2 样品采集与测试

本次研究样品均采自川东南地区贵州省的吼滩剖面($28^{\circ}21'13''N, 106^{\circ}25'18''E$)。该剖面露头洗象池组地层连续,层厚度约为650 m。本次研究共采集剖面样品122件,室内分析首先挑选未经明显后期蚀变的新鲜样品,以确保样品能够尽量反映原始沉积环境及特征。每个样品均制备成一个薄片和与之镜像对称的厚片,其中薄片经茜素红试剂染色用于岩相观察,厚片抛光用于微钻取样,同时选取了部分样品磨制铸体薄片用于镜下孔隙观察;进一步地,本次研究基于薄片观察选取了41件岩性均匀且未受明显成岩改造的碳酸盐岩样品,利用低速微钻在其对应的厚片上各钻取约20 mg粉末样,用于碳、氧同位素分析。

碳、氧同位素测试在长江大学地球科学学院实验中心完成。粉末样与浓正磷酸($>99\%$)在 $70^{\circ}C$ 条件下充分反应,收集30分钟内的 CO_2 气体,然后利用DELTA V Advantage SN09017D Thermofisher同位素比质谱仪测量 CO_2 气体的同位素比值。分析结果根据Vienna Pee Dee Belemnite(VPDB)标准(Coplen,1995)计算并分别记录为 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 。C和O同位素的分析精度分别优于 0.22% 和 0.37% 。

3 岩石学特征

川东南地区洗象池组岩性以中—厚层纯白云岩为主,偶夹少量泥质云岩(图2-A)和云质粉砂岩(图2-B)。结合野外观察与镜下薄片分析,根据白云岩结构类型可分为残余颗粒白云岩(图2-

C,D)与晶粒白云岩。其中,后者根据其晶粒大小可进一步细分为泥晶—细粉晶白云岩(图2-E,F)与粗粉—细晶白云岩(图2-G,I)。在洗象池组白云岩中,泥晶—细粉晶白云岩占绝对优势,残余颗粒白云岩次之,粗粉—细晶白云岩相对少见;纵向上看,残余颗粒白云岩与粗粉—细晶白云岩在地层中上部相对较多。

残余颗粒白云岩在野外露头主要呈薄—中层状产出,新鲜面呈深灰色,根据其残余颗粒类型可进一步细分为残余砂屑白云岩(图2-C)、残余砾屑白云岩(图2-D)以及少量残余凝块白云岩等。少量结构保存相对完整的颗粒白云岩显示,其以亮晶胶结为主,局部见世代胶结特征(图2-C),属于高能颗粒滩相的产物。残余颗粒白云岩虽经历过一定重结晶作用,但仍保留了部分原始颗粒结构,属于颗粒白云岩与晶粒白云岩的过渡类型。残余颗粒白云岩常发育粒间(溶)孔(图2-D),是研究区内重要的一种储集岩性。

晶粒白云岩在野外露头常呈中—厚层状产出,新鲜面呈浅灰—灰色,包括泥晶—细粉晶白云岩(图2-E,F)和粗粉—细晶白云岩(图2-G,I)。泥晶—细粉晶白云岩晶粒细小(晶径低于 $50\mu m$),以半自形为主,结构整体较为致密。局部见大量粒状黄铁矿富集(图2-F)。粗粉—细晶白云岩晶粒相对较粗(晶径介于 $50\sim 200\mu m$),以他形—半自形为主,呈镶嵌接触,见少量晶间(溶)孔(图2-I)。部分白云石晶粒发育雾心亮边结构(图2-G)。此外,部分粗粉—细晶白云岩见颗粒幻影(图2-H),指示原岩为颗粒白云岩。

4 碳、氧同位素特征

4.1 数据有效性分析

碳、氧同位素在海洋中的组成具有稳定性,且碳酸盐岩在形成时能携带大量同期的海洋化学信息(Glumar and Spivak,2002),因此海相碳酸盐岩中碳、氧同位素组成能够近似地反映同期海洋碳、氧同位素的组成,常用于海洋古环境恢复(杨雪琪等,2017)。然而,古老的海相碳酸盐岩在漫长的地质历史时期往往经历了不同程度的成岩改造,从而导致其碳、氧同位素组成叠加了部分成岩作用的信息,因此在将碳、氧同位素用于古环境分析前需要评估数据的有效性。首先,吼滩剖面洗象池组41个样品的碳、氧同位素测试结果显示,

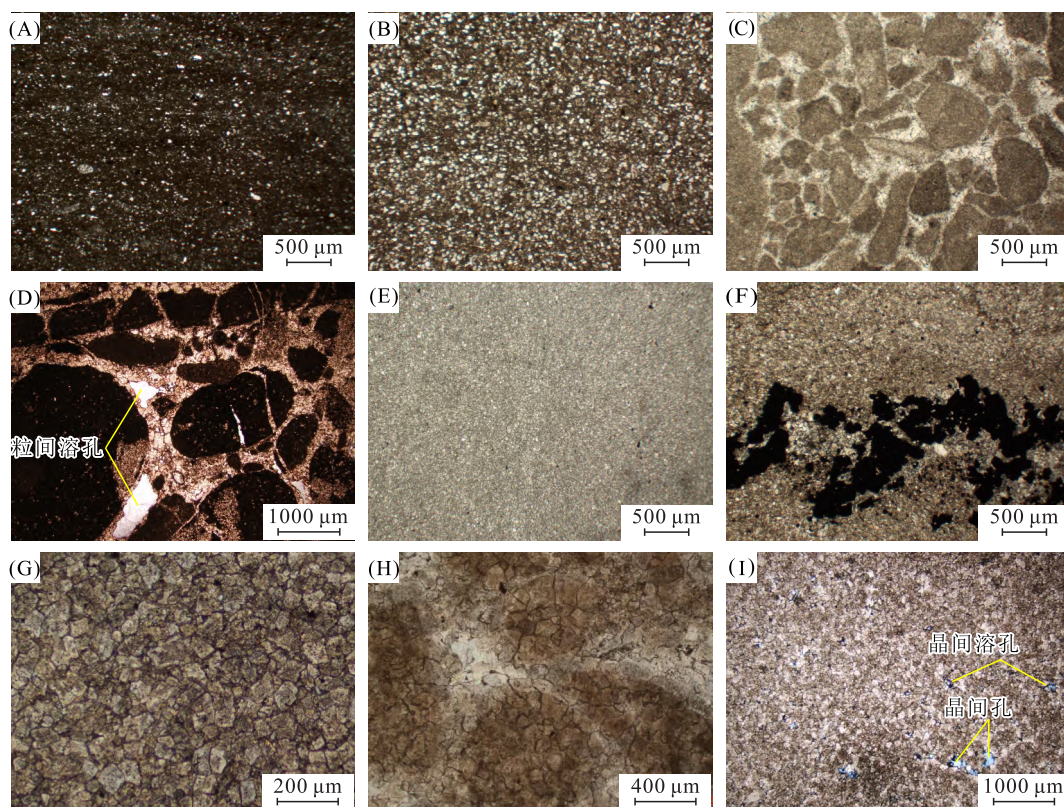


图 2 川东南地区吼滩剖面洗象池组镜下特征

Fig. 2 Microscopic characteristics of the Xixiangchi Formation of the Houtan section in the southeastern Sichuan Basin

- (A) 泥质云岩, 含少量粉砂, 单偏光, HT3-2, 667.1 m; (B) 云质粉砂岩, 单偏光, HT7-1, 629.9 m;
 (C) 残余砂屑白云岩, 可识别两世代胶结结构, 第一世代为纤状胶结, 第二世代为粉晶粒状胶结, 单偏光, HT11-15, 367.7 m; (D) 残余砂砾屑白云岩, 发育砾间溶孔, 单偏光, HT6-1-1, 644.3 m;
 (E) 泥晶白云岩, 单偏光, HT30-3, 102.8 m; (F) 细粉晶白云岩, 粒状黄铁矿富集, 单偏光, HT15-1, 215.7 m;
 (G) 粗粉晶白云岩, 见雾心亮边结构, 单偏光, HT25-2, 124.2 m; (H) 粗粉—细晶白云岩, 见颗粒幻影, 单偏光, HT13-2, 260.7 m; (I) 细晶白云岩, 见晶间(溶)孔, 单偏光, 蓝色铸体, HT17-2, 191.2 m

所选样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布范围为 $-11.05\text{‰} \sim -8.29\text{‰}$, 除 4 个样品 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 -11.05‰ , -10.77‰ , -10.75‰ 和 -10.64‰ 外, 其余 37 个样品皆高于 -10.5‰ , 平均为 -9.67‰ , 介于同期海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值范围内 (Veizer et al., 1999), 表明成岩作用对同位素组成的影响较小。这与 $\delta^{13}\text{C}$ 值的分析结果一致, 即样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 $-2.29\text{‰} \sim 1.36\text{‰}$ 之间, 平均为 -0.73‰ , 与正常海相碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值 ($0 \pm 2\text{‰}$) 的范围基本吻合。此外, 前人研究表明, 当碳酸盐岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值大于 -10‰ 时, 碳酸盐岩可能经历了微弱的成岩蚀变, 数据可以反映其沉积期的地球化学特征 (Kaufman and Knoll, 1995)。对于本次研究而言 (表 1), 虽然有部分碳酸盐岩样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值略小于 -10‰ , 但整体来看洗象池组白云岩样品一定

程度上仍保存着原始的海水信号 (Zhang et al., 2022)。另外, 洗象池组碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值不存在明显的正相关性 (图 3), 同样说明了本次研究的海相碳酸盐岩样品基本保存了原始的碳、氧同位素组成 (Qing and Veizer, 1994)。因此, 综合认为本次研究的碳酸盐岩样品的成岩蚀变作用较弱, 基本保存了碳、氧同位素的原始组成特征, 可以用于古环境分析。

4.2 碳、氧同位素纵向变化特征

吼滩剖面洗象池组 $\delta^{13}\text{C}$ 值自下而上整体呈先降低、后升高的趋势, 在中上部有一次明显的正漂移事件 (图 4)。具体来说, 下部 $\delta^{13}\text{C}$ 值波动幅度较小, 基本稳定在 $-1\text{‰} \sim 0$, 而在中下部呈降低趋势, 最低值达到 -2.29‰ 左右; 经历短暂负偏后, $\delta^{13}\text{C}$ 值快速升高, 在中上部显示出明显的

表 1 川东南地区吼滩剖面洗象池组碳酸盐岩碳、氧同位素组成以及古温度和古盐度数据
 Table 1 Data on $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$, paleotemperature, and paleosalinity from the Xixiangchi Formation of the Houtan section in the southeastern Sichuan Basin

样品编号	岩性	取样深度/ m	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ (VPDB)	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ (VPDB)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{校正}}/\text{‰}$ (VPDB)	$T_{\text{校正}}/\text{°C}$	$Z_{\text{校正}}$
HT1-1	泥晶白云岩	672.1	-1.13	-10.09	-1.63	23.1	124.2
HT3-2	含泥质白云岩	668.0	-0.60	-10.34	-1.88	24.2	125.1
HT6-1-3	泥晶白云岩	643.0	-1.31	-10.75	-2.29	26.2	123.5
HT6-1-4	泥晶白云岩	641.0	-0.28	-9.37	-0.91	19.9	126.3
HT7-2	泥晶白云岩	622.5	-1.34	-8.88	-0.42	17.7	124.3
HT7-3	泥晶白云岩	590.0	-0.14	-11.05	-2.59	27.6	125.7
HT8-3	细粉晶白云岩	500.2	-0.78	-9.61	-1.15	20.9	125.1
HT9-2	细粉晶—泥晶白云岩	491.2	-0.52	-9.31	-0.85	19.6	125.8
HT9-2-2	细粉晶白云岩	473.2	-0.66	-9.00	-0.54	18.2	125.7
HT9-3	粗粉晶白云岩	443.2	-1.35	-9.98	-1.52	22.6	123.8
HT9-4-1	含粉砂云岩	432.2	-0.99	-8.29	0.17	15.3	125.4
HT9-8	残余砂屑白云岩	420.9	-1.74	-9.06	-0.60	18.5	123.4
HT11-6	细粉晶白云岩	412.9	-2.29	-10.36	-1.90	24.3	121.7
HT11-9	残余砂屑白云岩	401.3	-1.48	-9.58	-1.12	20.8	123.7
HT11-10	细粉晶白云岩	393.3	-0.73	-9.19	-0.73	19.1	125.4
HT11-12	细粉晶白云岩	379.3	-1.65	-9.46	-1.00	20.3	123.4
HT11-13	残余砂屑白云岩	369.3	-1.94	-9.56	-1.10	20.7	122.8
HT11-16	细粉晶白云岩	354.0	-1.01	-10.47	-2.01	24.8	124.2
HT12-7	残余砂屑云岩	320.0	-0.78	-9.62	-1.16	20.9	125.1
HT13-1	细粉晶白云岩	280.5	-0.41	-8.30	0.16	15.3	126.5
HT13-2	细晶白云岩	260.8	1.09	-9.84	-0.88	19.7	131.4
HT13-3	粗粉晶白云岩	255.8	1.36	-9.72	-1.26	21.4	129.5
HT14-2	残余砂屑白云岩	229.6	-0.10	-9.97	-1.51	22.5	126.3
HT15-1	细粉晶白云岩	215.6	0.57	-10.64	-2.18	25.6	127.4
HT16-1	细粉晶白云岩	206.0	0.23	-9.33	-0.87	19.7	127.3
HT18-1	细粉晶白云岩	194.2	-0.18	-9.27	-0.81	19.4	126.5
HT19-2	细粉—粗粉晶白云岩	187.8	-0.89	-9.88	-1.42	22.1	124.8
HT20-2	细粉晶白云岩	172.9	-0.88	-9.53	-1.07	20.6	125.0
HT21-2-2	细粉晶白云岩	155.4	-1.39	-9.03	-0.57	18.4	124.2
HT22-1-2	细粉晶白云岩	148.0	-0.58	-8.97	-0.51	18.1	125.9
HT23-1	粗粉—细晶白云岩	139.7	-0.41	-10.77	-2.31	26.3	125.3
HT25-2	粗粉晶白云岩	124.0	-2.28	-9.80	-1.34	21.8	122.0
HT28-1	泥晶白云岩	116.3	-1.72	-9.97	-1.51	22.5	123.0
HT30-3	泥晶白云岩	102.9	-1.47	-9.68	-1.22	21.2	123.7
HT35-1	残余砂屑白云岩	87.8	-0.34	-9.01	-0.55	18.3	126.3
HT37-2	细粉晶白云岩	75.7	-0.89	-9.30	-0.84	19.5	125.1
HT39-2	细粉晶白云岩	65.0	-0.81	-9.48	-1.02	20.3	125.1
HT42-1	泥晶白云岩	42.1	-0.73	-10.15	-1.69	23.3	125.0
HT46-2	细粉晶白云岩	31.0	0.17	-9.64	-1.18	21.1	127.1
HT47-1	泥晶白云岩	23.0	-0.11	-9.74	-1.28	21.5	126.4
HT50-1	细粉晶白云岩	7.5	0.37	-10.49	-2.03	24.9	127.1

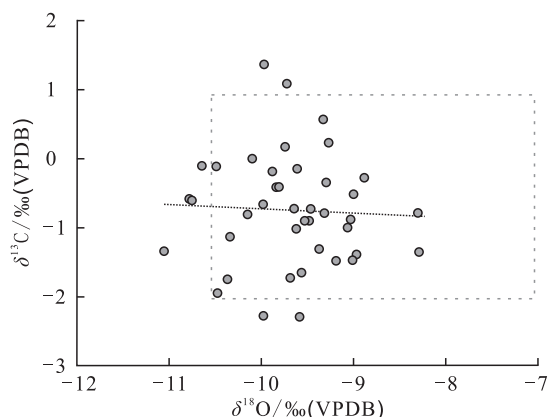


图 3 川东南地区吼滩剖面洗象池组碳、氧同位素组成分布特征

Fig. 3 Relationship between the measured values of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ from the Xixiangchi Formation of the Houtan section in the southeastern Sichuan Basin
图中灰色虚线框为中—晚寒武世海水的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 范围,其值来自 Veizer(1983)

正漂移现象,最高值达到 1.36‰,漂移幅度为 3.65‰;随后, $\delta^{13}\text{C}$ 值又经历了一次大幅度的降低,最低值达到 -2.29‰,在顶部回升到 0~1‰。

相较而言, $\delta^{18}\text{O}$ 值纵向上波动幅度较小,基本保持稳定。对比研究发现,吼滩剖面洗象池组碳、氧同位素纵向变化特征与蜀南地区威寒 1 井(贾鹏等,2016)和川中地区广探 2 井(曹庆超等,2021)等典型钻井的同位素演化特征相似,说明川东南地区寒武纪洗象池期可能先后经历了 2 次海平面快速上升与缓慢下降,以及后期的波动上升(贾鹏等,2016;曹庆超等,2021)。

5 碳、氧同位素分析及地质意义

5.1 古盐度分析

一般认为,海相碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值与同期海水盐度具有正相关关系(Clayton and Degens,1959)。为区分侏罗纪以来的海相石灰岩和淡水石灰岩,Keith and Weber(1964)提出了一个古盐度计算公式:

$$Z = 2.048(\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498(\delta^{18}\text{O} + 50) \quad (1)$$

当 Z 值 ≥ 120 时,指示碳酸盐岩形成于海相环境,而 < 120 时,则指示其形成于淡水环境。

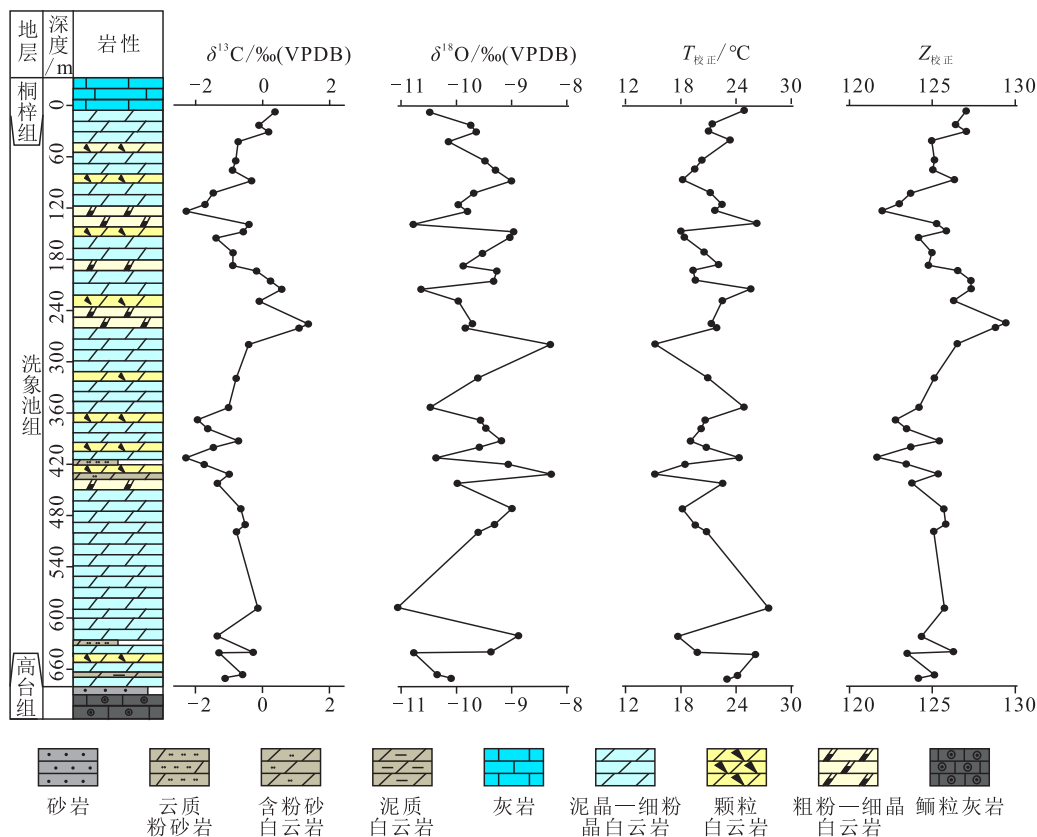


图 4 川东南地区剖面洗象池组碳、氧同位素组成以及古温度和古盐度特征及变化

Fig. 4 Characteristics of and variations in $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$, paleotemperature, and paleosalinity in the Xixiangchi Formation of the Houtan section in the southeastern Sichuan Basin

对于中生代以前海相碳酸盐岩而言,不同程度的成岩作用可能会降低这些岩石碳、氧同位素指示古温度和古盐度的可靠性。一般来说,碳酸盐岩的年代越早,受成岩作用改造越强烈,碳、氧同位素组成偏离原始信号也越大,这种效应被称为“年代效应”(邵龙义,1994)。通过以第四纪海相碳酸盐岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值平均值(-1.2‰)为标准对研究样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值进行校正(邵龙义等,1996;孟昊等,2016),可以很大程度上降低这种年代效应的影响。本次研究样品的平均 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -9.67‰ ,与第四纪海相碳酸盐岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相差 -8.47‰ ,则 $\Delta\delta^{18}\text{O}=8.47\text{‰}$ 。利用该值对本次测得的 $\delta^{18}\text{O}$ 值进行校正后,带入上述公式计算出川东南地区洗象池期海水的古盐度值。

结果表明,研究区洗象池组 Z 值分布在 $121.7\sim 129.5$ (表1),平均值为 125.2 ,指示洗象池组碳酸盐岩形成于海相环境,其形成几乎未受到淡水影响。纵向上,洗象池组中一晚沉积期海水盐度较早期略微升高,且波动幅度较大。

5.2 古温度分析

相较于水体盐度,碳酸盐岩中氧同位素组成更易受到水体温度影响(王大锐等,2001)。由于碳酸盐矿物形成时,氧同位素交换反应对温度具有显著的敏感性,因此氧同位素组成常用于反映流体的温度信息。此外,由于碳同位素组成随温度变化较小,所以当盐度相对稳定时,氧同位素组成可用于测定古温度(张秀莲,1985)。本文采用杨雪琪等(2017)校正的经验公式,即

$$T=15.976-4.2\delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3}+0.13(\delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3}+0.22)^2 \quad (2)$$

考虑到年代效应对氧同位素组成的影响,公式中的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3}$ 用样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 校正值替换。计算结果表明,研究区洗象池组碳酸盐岩沉积期的海水温度介于 $15.2\text{℃}\sim 27.5\text{℃}$ (表1),平均温度为 21.2℃ 。反映研究区在洗象池组沉积期处于温暖或炎热的亚热带气候环境,这一点得到了寒武纪期间四川盆地所处的古地理位置的证实(李江海等,2014)。纵向上,洗象池组沉积期海水温度具频繁波动的特点。

5.3 碳同位素变化与全球对比

“SPICE”事件具全球可对比性, $\delta^{13}\text{C}$ 值漂移幅度约 4‰ (Pulsipher et al., 2021)。据 Saltzman et al. (2000)的报道,“SPICE”事件起始于三

叶虫 *Glyptagnostus reticulatus* 带之底,而 *G. reticulatus* 是全球寒武系芙蓉统底界线的生物标志,因此该事件可用于确定芙蓉统的底界线。樊茹等(2011)对比并总结了全球关于“SPICE”事件的研究,认为该事件在华南地区也有很好的可对比性。李伟等(2017)通过在四川盆地及邻区建立碳同位素剖面,结合“SPICE”事件和电性曲线特征,从而确定了盆内芙蓉统的底界线。

本文将川东南地区吼滩剖面的碳酸盐岩碳同位素曲线与西伯利亚 Kulyumbe 剖面(Kouchinsky et al., 2008),哈萨克斯坦 Kyrshabakty 剖面(Saltzman et al., 2000),湖南大庸(今张家界)瓦尔岗剖面(Saltzman et al., 2000),贵州金沙岩孔剖面(左景勋等,2008),太和1井(贾鹏等,2017b)和利1井(李伟等,2017)的 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线进行对比分析(图5),认为吼滩剖面碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线可与其他地区中一晚寒武世 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线较好的对应,说明吼滩剖面碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线具有较好的代表性。“SPICE”事件的成因尚未有定论,目前认为可能有以下几个方面:(1)沉积有机质埋藏量增加(Saltzman et al., 2000;左景勋等,2020);(2)甲烷水合物大量生成(樊茹等,2011);(3)碳酸盐岩的风化作用(Kump and Arthur, 1999)。但总体而言,“SPICE”指示中一晚寒武世最大的海退事件。

5.4 碳同位素指示含盐盆地演化

蒸发岩类物质的沉积顺序取决于溶解度,在持续的蒸发作用下,碳酸盐类矿物沉淀后,其次是硫酸盐矿物(石膏/硬石膏)、石盐和钾、镁盐相继析出。碳酸盐岩与蒸发岩类关系密不可分,一方面世界上已知的大型盐类矿床几乎均产于碳酸盐岩相,另一方面在白云岩—蒸发岩共生体系中,由于蒸发岩除封盖作用外,在白云岩储层形成方面也有重要影响,因此共生体系中的白云岩油气勘探潜力巨大(马奎等,2016;文华国等,2021)。四川盆地寒武系蒸发岩以膏盐岩为主,主要集中在龙王庙组和高台组地层,少数分布在洗象池组(徐安娜等,2016)。根据含盐层位与膏盐岩的空间分布特征,将四川盆地寒武系膏盐岩富集区大致划分为川东南次盐盆地和渝东北次盐盆地(王淑丽等,2016)。

$\delta^{13}\text{C}$ 值与盐度具有正相关关系, $\delta^{13}\text{C}$ 值越高对应盐度越高(张秀莲,1985;吴亮君等,2023)。根据吼滩剖面与太和1井和利1井的洗象池组

$\delta^{13}\text{C}$ 曲线对比(图 5),认为“SPICE”事件对应川东地区洗象池期大规模的海退事件,导致环境相对封闭,水体盐度相对较高。具体而言,利 1 井碳

酸盐岩样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对川东南地区较高,盐度也相对较高,这与王淑丽等(2016)四川盆地寒武系盐盆地由川东南向渝东北演化的认识一致。

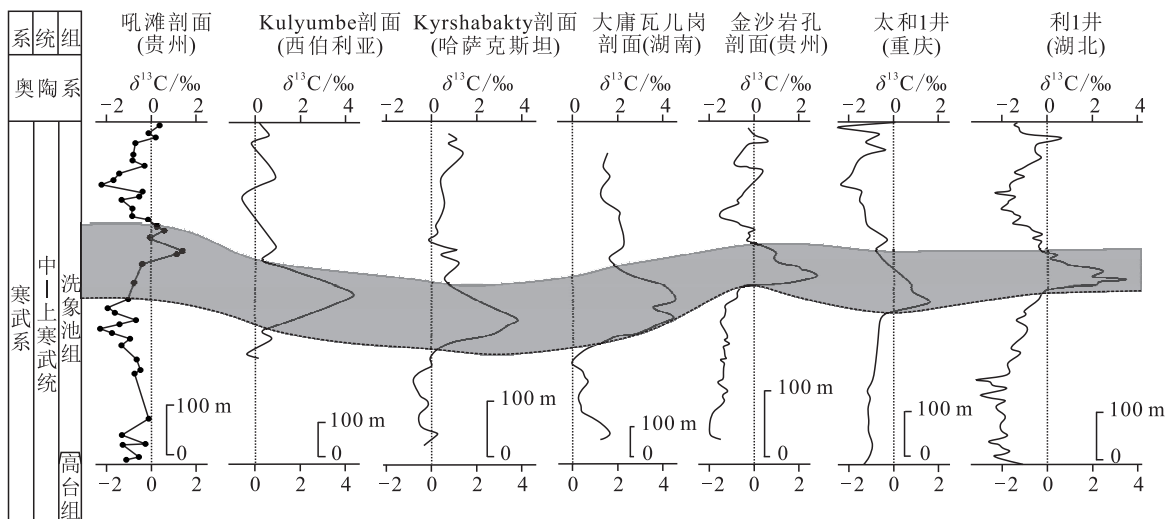


图 5 川东南地区吼滩剖面与西伯利亚、哈萨克斯坦和川东南邻区洗象池期 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线对比

Fig. 5 Comparison of the curves of $\delta^{13}\text{C}$ of samples from the Houtan section in southeastern Sichuan in the Xixiangchi period with those from Siberia, Kazakhstan, and areas adjacent to southeastern Sichuan

西伯利亚 Kulumbe 剖面据 Kouchinsky et al. (2008), 哈萨克斯坦 Kyrshabakty 剖面 and 湖南大庸瓦儿岗剖面据 Saltzman et al. (2000), 贵州金沙岩孔剖面据左景勋等(2008), 太和 1 井据贾鹏等(2017b)和利 1 井据李伟等(2017)

6 结论

a. 川东南地区吼滩剖面洗象池组岩性以泥晶—细粉晶白云岩为主,含少量残余砂屑白云岩、粗粉—细晶白云岩等;样品的碳、氧同位素特征基本保留了同期海水的信息。本次 41 个样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布在 $-11.05\text{‰} \sim -8.29\text{‰}$ 范围,平均为 -9.67‰ ; $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 $-2.29\text{‰} \sim 1.36\text{‰}$ 之间,平均为 -0.73‰ 。

b. 吼滩剖面洗象池组 $\delta^{13}\text{C}$ 值自下而上整体先降低、后升高,在中上部有一次明显的“SPICE”正漂移事件,最大正漂移值位于剖面中上部,漂移幅度为 3.65‰ ,与全球其他地区等时剖面的 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线特征具有较好的可对比性。

c. 中一晚寒武世洗象池期川东南地区整体处于海相环境,且海水温度介于 $15.2\text{℃} \sim 27.5\text{℃}$ 之间,平均温度为 21.2℃ ,反映该时期属于温暖或炎热的亚热带气候,可能存在大规模海退事件。

d. 对比川东南地区吼滩剖面与太和 1 井和渝东北地区利 1 井的碳同位素特征,认为渝东北地区盐度相对川东南地区较高,说明洗象池期盐盆

地逐渐由川东南向渝东北迁移,为寻找石盐及钾盐矿床提供了指导意义。

[参 考 文 献]

曹庆超,白壮壮,李浩武,等,2021. 测井数据小波变换在川中寒武系洗象池群层序地层划分中的应用[J]. 地质科技通报,40(4):242-251.

Cao Q C, Bai Z Z, Li H W, et al., 2021. Application of wavelet transformation of logging data in sequence stratigraphic division of Cambrian Xixiangchi group in central Sichuan basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 40(4): 242-251. (in Chinese)

樊茹,邓胜徽,张学磊,2011. 寒武系碳同位素漂移事件的全球对比性分析[J]. 中国科学(地球科学),41(12): 1829-1839.

Fan R, Deng S H, Zhang X L, 2011. Significant carbon isotope excursions in the Cambrian and their implications for global correlations[J]. Scientia Sinica(Terrae), 41(12): 1829-1839. (in Chinese)

冯增昭,彭勇民,金振奎,等,2002. 中国晚寒武世岩相古地理[J]. 古地理学报,4(3):1-10.

Feng Z Z, Peng Y M, Jin Z K, et al., 2002. Lithofacies

- palaeogeography of the Late Cambrian in China[J]. Journal of Palaeogeography, 4(3): 1-10. (in Chinese)
- 谷明峰,李文正,邹倩,等,2020. 四川盆地寒武系洗象池组岩相古地理及储层特征[J]. 海相油气地质, 25(2): 162-170.
- Gu M F, Li W Z, Zou Q, *et al.*, 2020. Lithofacies palaeogeography and reservoir characteristics of the Cambrian Xixiangchi Formation in Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 25(2): 162-170. (in Chinese)
- 贾鹏,李明,卢远征,等,2017a. 四川盆地寒武系洗象池群层序地层划分及层序地层格架的建立[J]. 地质科技情报, 36(2): 119-127.
- Jia P, Li M, Lu Y Z, *et al.*, 2017a. Sequence stratigraphic subdivision and establishment of sequence stratigraphic framework in the Cambrian Xixiangchi Group of Sichuan Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 36(2): 119-127. (in Chinese)
- 贾鹏,李伟,李明,等,2017b. 四川盆地东部地区寒武系洗象池群碳酸盐岩碳、氧同位素特征及其意义[J]. 古地理学报, 19(3): 503-512.
- Jia P, Li W, Li M, *et al.*, 2017b. Characteristics of carbon and oxygen isotopes and their significance of the Cambrian Xixiangchi Group carbonate rocks in eastern Sichuan Basin[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 19(3): 503-512. (in Chinese)
- 贾鹏,李伟,卢远征,等,2016. 四川盆地中南部地区洗象池群沉积旋回的碳氧同位素特征及地质意义[J]. 现代地质, 30(6): 1329-1338.
- Jia P, Li W, Lu Y Z, *et al.*, 2016. Carbon and oxygen isotopic compositions and their evolution records of the Xixiangchi Group in sedimentary sequences of central-southern Sichuan Basin and their geological implications[J]. Geoscience, 30(6): 1329-1338. (in Chinese)
- 江文剑,侯明才,邢凤存,等,2016. 川东南地区娄山关群白云岩稀土元素特征及其意义[J]. 石油与天然气地质, 37(4): 473-482.
- Jiang W J, Hou M C, Xing F C, *et al.*, 2016. Characteristics and indications of rare earth elements in dolomite of the Cambrian Loushanguan Group, SE Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 37(4): 473-482. (in Chinese)
- 井攀,黄加力,百成钢,等,2016. 四川盆地洗象池组层序地层及沉积相研究现状[J]. 山东化工, 45(11): 65-66.
- Jing P, Huang J L, Bai C G, *et al.*, 2016. The present research situation of sequence and sedimentary facies of Xixiangchi Formation of Sichuan Basin[J]. Shandong Chemical Industry, 45(11): 65-66. (in Chinese)
- 李江海,韩喜球,毛翔,2014. 全球构造图集[M]. 北京:地质出版社.
- Li J H, Han X Q, Mao X, 2014. Global Tectonic Atlas [M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- 李璐萍,梁金同,刘四兵,等,2022. 川中地区寒武系洗象池组白云岩储层成岩作用及孔隙演化[J]. 岩性油气藏, 34(3): 39-48.
- Li L P, Liang J T, Liu S B, *et al.*, 2022. Diagenesis and pore evolution of dolomite reservoirs of Cambrian Xixiangchi Formation in central Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 34(3): 39-48. (in Chinese)
- 李伟,贾鹏,樊茹,等,2017. 四川盆地及邻区中上寒武统洗象池群碳同位素特征与芙蓉统底界标志[J]. 天然气工业, 37(10): 1-10.
- Li W, Jia P, Fan R, *et al.*, 2017. Carbon isotope characteristics of the Middle-Upper Cambrian Xixiangchi Group and bottom boundary marks of Furong series in the Sichuan basin and its adjacent areas[J]. Natural Gas Industry, 37(10): 1-10. (in Chinese)
- 林怡,陈聪,山述娇,等,2017. 四川盆地寒武系洗象池组储层基本特征及主控因素研究[J]. 石油实验地质, 39(5): 610-617.
- Lin Y, Chen C, Shan S J, *et al.*, 2017. Reservoir characteristics and main controlling factors of the Cambrian Xixiangchi Formation in the Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 39(5): 610-617. (in Chinese)
- 马奎,胡素云,王铜山,等,2016. 膏盐岩对碳酸盐层系油气成藏的影响及勘探领域分析[J]. 地质科技情报, 35(2): 169-176.
- Ma K, Hu S Y, Wang T S, *et al.*, 2016. Effect of gypsum rock on the hydrocarbon accumulation in carbonate layers and analysis of exploration field[J]. Geological Science and Technology Information, 35(2): 169-176. (in Chinese)
- 孟昊,任影,钟大康,等,2016. 四川盆地东部寒武系龙王庙组地球化学特征及其古环境意义[J]. 天然气地球科学, 27(7): 1299-1311.
- Meng H, Ren Y, Zhong D K, *et al.*, 2016. Geochemical characteristic and its paleoenvironmental implication of Cambrian Longwangmiao Formation in eastern Sichuan Basin, China [J]. Natural Gas Geoscience,

- 27(7):1299-1311. (in Chinese)
- 邵龙义, 窦建伟, 张鹏飞, 1996. 西南地区晚二叠世氧、碳稳定同位素的古地理意义[J]. 地球化学, (6): 575-581.
- Shao L Y, Dou J W, Zhang P F, 1996. Paleogeographic significances of carbon and oxygen isotopes in late Permian rocks of southwest China[J]. *Geochimica*, (6): 575-581. (in Chinese)
- 邵龙义, 1994. 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, (1): 39-45.
- Shao L Y, 1994. The relation of the oxygen and carbon isotope in the carbonate rocks to the paleotemperature etc. [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, (1): 39-45. (in Chinese)
- 石书缘, 王铜山, 刘伟, 等, 2020. 四川盆地寒武系洗象池组储层特征及天然气勘探潜力[J]. 天然气地球科学, 31(6): 773-785.
- Shi S Y, Wang T S, Liu W, *et al.*, 2020. Reservoir characteristic and gas exploration potential in Cambrian Xixiangchi Formation of Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 31(6): 773-785. (in Chinese)
- 宋昊南, 卢远征, 谭聪, 等, 2019. 陕西岐山蓊县系碳氧同位素特征及其古环境意义[J]. 地质学报, 93(8): 2068-2080.
- Song H N, Lu Y Z, Tan C, *et al.*, 2019. C and O isotopic characteristics of the Mesoproterozoic Jixian System in Qishan, Shaanxi Province, China and their paleoenvironment implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(8): 2068-2080. (in Chinese)
- 王大锐, 白玉雷, 贾承造, 2001. 塔里木盆地油区石炭系海相碳酸盐岩同位素地球化学研究[J]. 石油勘探与开发, 28(6): 38-41.
- Wang D R, Bai Y L, Jia C Z, 2001. Stable isotopic geochemistry of the Carboniferous marine carbonates in the Tarim basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 28(6): 38-41. (in Chinese)
- 王淑丽, 郑绵平, 张震, 等, 2016. 四川盆地寒武系含盐盆地演化及其找钾意义: 来自碳氧同位素的证据[J]. 地学前缘, 23(5): 202-220.
- Wang S L, Zheng M P, Zhang Z, *et al.*, 2016. Carbon and oxygen isotopic compositions of Cambrian marine carbonates in Sichuan Basin, China: Implications for sedimentary evolution and potash finding[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(5): 202-220. (in Chinese)
- 魏国齐, 杨威, 谢武仁, 等, 2018. 四川盆地震旦系—寒武系天然气成藏模式与勘探领域[J]. 石油学报, 39(12): 1317-1327.
- Wei G Q, Yang W, Xie W R, *et al.*, 2018. Accumulation modes and exploration domains of Sinian-Cambrian natural gas in Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 39(12): 1317-1327. (in Chinese)
- 文华国, 霍飞, 郭佩, 等, 2021. 白云岩—蒸发岩共生体系研究进展及展望[J]. 沉积学报, 39(6): 1321-1343.
- Wen H G, Huo F, Guo P, *et al.*, 2021. Advances and prospects of dolostone-evaporite paragenesis system[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(6): 1321-1343. (in Chinese)
- 文华国, 梁金同, 周刚, 等, 2022. 四川盆地及周缘寒武系洗象池组层序—岩相古地理演化与天然气有利勘探区带[J]. 岩性油气藏, 34(2): 1-16.
- Wen H G, Liang J T, Zhou G, *et al.*, 2022. Sequence-based lithofacies paleogeography and favorable natural gas exploration areas of Cambrian Xixiangchi Formation in Sichuan Basin and its periphery[J]. *Lithologic Reservoirs*, 34(2): 1-16. (in Chinese)
- 吴亮君, 王璞珺, 叶庆子, 等, 2023. 湘西奥陶系红色碳酸盐岩碳、氧同位素组成特征及古环境意义[J]. 地质学报, 97(4): 1245-1261.
- Wu L J, Wang P J, Ye Q Z, *et al.*, 2023. Characteristics of carbon and oxygen isotopic compositions and the palaeoenvironmental significance of Ordovician red carbonate rocks in Xiangxi, Hunan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 97(4): 1245-1261. (in Chinese)
- 徐安娜, 胡素云, 汪泽成, 等, 2016. 四川盆地寒武系碳酸盐岩—膏盐岩共生体系沉积模式及储层分布[J]. 天然气工业, 36(6): 11-20.
- Xu A N, Hu S Y, Wang Z C, *et al.*, 2016. Sedimentary mode and reservoir distribution of the Cambrian carbonate & evaporite paragenesis system in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 36(6): 11-20. (in Chinese)
- 徐世琦, 代宗仰, 蒋小光, 等, 2006. 古隆起区带寒武系洗象池群成藏条件与勘探前景分析[J]. 天然气勘探与开发, 29(4): 4-8.
- Xu S Q, Dai Z Y, Jiang X G, *et al.*, 2006. Oil and gas exploration prospects of Cambrian Xixiangchi Member in palaeo-uplift zone[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 29(4): 4-8. (in Chinese)
- 杨雪琪, 钟大康, 任影, 等, 2017. 重庆东部地区寒武系龙王庙组碳、氧同位素特征及其意义[J]. 古地理学报, 19(5): 865-878.
- Yang X Q, Zhong D K, Ren Y, *et al.*, 2017. Characteristics and significance of carbon and oxygen isotopes of the Cambrian Longwangmiao Formation, eastern Chongqing

- [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 19(5):865—878. (in Chinese)
- 张浩然,姜华,陈志勇,等,2020. 四川盆地及周缘地区加里东运动幕次研究现状综述[J]. *地质科技通报*, 39(5):118—126.
- Zhang H R, Jiang H, Chen Z Y, *et al.*, 2020. A review of the research status of Caledonian movement stages in Sichuan Basin and surrounding areas[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 39(5):118—126. (in Chinese)
- 张秀莲,1985. 碳酸盐岩中氧、碳稳定同位素与古盐度、古水温的关系[J]. *沉积学报*, (4):17—30.
- Zhang X L, 1985. Relationship between carbon and oxygen stable isotope in carbonate rocks and paleosalinity and paleotemperature of seawater[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, (4):17—30. (in Chinese)
- 左景勋,彭善池,朱学剑,2008. 扬子地台寒武系碳酸盐岩的碳同位素组成及地质意义[J]. *地球化学*, 37(2):118—128.
- Zuo J X, Peng S C, Zhu X J, 2008. Carbon isotope composition of Cambrian carbonate rocks in Yangtze Platform, South China and its geological implications[J]. *Geochimica*, 37(2):118—128. (in Chinese)
- 左景勋,朱学剑,方怀宾,等,2020. 华北寒武系芙蓉统底界附近的碳同位素组成演化特征[J]. *地球科学*, 45(3):728—738.
- Zuo J X, Zhu X J, Fang H B, *et al.*, 2020. Carbon isotope trend across the base of Furongian Series of Cambrian, northern Henan, north China[J]. *Earth Science*, 45(3):728—738. (in Chinese)
- Clayton R N, Degens E T, 1959. Use of carbon isotope analyses of carbonates for differentiating fresh-water and marine sediments[J]. *AAPG Bulletin*, 43(4):890—897.
- Coplen T B, 1995. Discontinuance of SMOW and PDB[J]. *Nature*, 75(6529):285.
- Glumac B, Spivak-Birndorf M L, 2002. Stable isotopes of carbon as an invaluable stratigraphic tool: An example from the Cambrian of the Northern Appalachians, USA[J]. *Geology*, 30(6):563—566.
- Hammer Ø, Svensen H H, 2017. Biostratigraphy and carbon and nitrogen geochemistry of the SPICE event in Cambrian low-grade metamorphic black shale, Southern Norway[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 468:216—227.
- Hou M C, Jiang W J, Xing F C, *et al.*, 2017. Origin of dolomites in the Cambrian (Upper 3rd-Furongian) Formation, south-eastern Sichuan Basin, China [J]. *Geofluids*, 16(5):856—876.
- Kaufman A J, Knoll A H, 1995. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: stratigraphic and biogeochemical implications[J]. *Precambrian Research*, 73(1—4):27—49.
- Keith M L, Weber J N, 1964. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28(10—11):1787—1816.
- Kouchinsky A, Bengtson S, Gallet Y, *et al.*, 2008. The SPICE carbon isotope excursion in Siberia: A combined study of the upper Middle Cambrian-lowermost Ordovician Kulyumbe River section, northwestern Siberian Platform [J]. *Geological Magazine*, 145(5):609—622.
- Kump L R, Arthur M A, 1999. Interpreting carbon-isotope excursions: Carbonates and organic matter[J]. *Chemical Geology* 161(1):181—198.
- Liu S G, Yang Y, Deng B, *et al.*, 2021. Tectonic evolution of the Sichuan Basin, Southwest China [J]. *Earth-Science Reviews*, 213:103470.
- Pulsipher M A, Schiffbauer J D, Jeffrey M J, *et al.*, 2021. A meta-analysis of the Steptoean Positive Carbon Isotope Excursion: The SPICEraq database [J]. *Earth-Science Reviews*, 212:103442.
- Qing H, Veizer J, 1994. Oxygen and carbon isotopic composition of Ordovician brachiopods: Implications for coeval seawater[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(20):4429—4442.
- Ren G X, Qin Q R, Qin Z J, *et al.*, 2022. Effects of diagenesis on quality of deep dolomite reservoirs: A case study of the Upper Cambrian Xixiangchi Formation in the eastern Sichuan Basin, China [J]. *Frontiers in Earth Science*, 10:984463.
- Saltzman M R, Ripperdan R L, Brasier M D, *et al.*, 2000. A global carbon isotope excursion (SPICE) during the late Cambrian: Relation to trilobite extinctions, organic-matter burial and sea level[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 162(3):211—223.
- Saltzman M R, Runnegar B, Lohmann K C, 1998. Carbon isotope stratigraphy of Upper Cambrian (Steptoean Stage) sequences of the eastern Great Basin: Record of a global oceanographic event[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 110(3):285—297.

- Rapp R P, Watson E B, 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 36(4): 891-931.
- Richards J P, 2011. Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and collided margins[J]. *Ore Geology Reviews*, 40(1): 1-26.
- Rubatto D, 2002. Zircon trace element geochemistry partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism[J]. *Chemical Geology*, 184(1): 123-138.
- Rushmer T, 1991. Partial melting of two amphibolites: Contrasting experimental results under fluid-absent conditions[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 107(1): 41-59.
- Sun S S, McDonough W F, 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publication*, 42(1): 313-345.
- Taylor S R, McLennan S M, 1995. The geochemical evolution of the continental crust[J]. *Reviews of Geophysics*, 33(2): 241-265.
- Turner S P, Foden J D, Morrison R S, 1992. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: An example from the Padthaway Ridge, South Australia[J]. *Lithos*, 28(2): 151-179.
- Wang F C, Li J Y, Shen Y J, *et al.*, 2022. The early-middle Silurian Delite monzogranite and quartz syenite, East Kunlun Orogenic Belt, NW China: Petrogenesis and implications for tectonic evolution of the Proto-Tethys[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 70(1): 113-125.
- Wiedenbeck M, Hanchar J M, Peck W H, *et al.*, 2004. Further characterisation of the 91500 zircon crystal [J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(1): 9-39.
- Wolf M B, London D, 1994. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts: An experimental study of solubilities and mechanisms [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(19): 4127-4145.
- Xin W, Sun F Y, Li L, *et al.*, 2018. The Wulonggou meta-luminous A₂-type granites in the Eastern Kunlun Orogenic Belt, NW China: Rejuvenation of subduction-related felsic crust and implications for post-collision extension[J]. *Lithos*, 312: 108-127.
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, *et al.*, 2006. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, northeast China: Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence [J]. *Lithos*, 89(1-2): 89-106.
- Yang J S, Robinson P T, Jiang C F, *et al.*, 1996. Ophiolites of the Kunlun Mountains, China and their tectonic implications [J]. *Tectonophysics*, 258(1-4): 215-231.
- Zhang J Y, Ma C Q, Xiong F H, *et al.*, 2014. Early Paleozoic high-Mg diorite-granodiorite in the Eastern Kunlun Orogen, western China: Response to continental collision and slab break-off [J]. *Lithos*, 210: 129-146.
- Zheng Z, Chen Y J, Deng X H, *et al.*, 2018. Origin of the Bashierxi monzogranite, Qiman Tagh, East Kunlun Orogen, NW China: A magmatic response to the evolution of the Proto-Tethys Ocean [J]. *Lithos*, 296: 181-194.
- Zhou B, Dong Y P, Zhang F F, *et al.*, 2016. Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of granitoids in the East Kunlun Orogenic Belt, northern Tibetan Plateau: Origin and tectonic implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 130: 265-281.
- Zhou X H, Sun M, Zhang G H, *et al.*, 2002. Continental crust and lithospheric mantle interaction beneath North China: Isotopic evidence from granulite xenoliths in Hannuoba, Sino-Korean craton [J]. *Lithos*, 62(3-4): 111-124.

(责任编辑:魏 威)

(上接第 221 页)

- Veizer J, Ala D, Azmy K, *et al.*, 1999. ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, δ^{13} C and δ^{18} O evolution of Phanerozoic seawater[J]. *Chemical Geology*, 161(1-3): 59-88.
- Veizer J, 1983. Chemical diagenesis of carbonates: Theory and application of trace element technique[J]. *Stable Isotopes in Sedimentary Geology*, 10(3): 1-100.

- Zhang P Y, Wang Y L, Zhang X J, *et al.*, 2022. Carbon, oxygen and strontium isotopic and elemental characteristics of the Cambrian Longwangmiao Formation in South China: Paleoenvironmental significance and implications for carbon isotope excursions[J]. *Gondwana Research*, 106: 174-190.

(责任编辑:魏 威)