



碳酸盐岩—蒸发岩共生体系沉积特征及演化模式——以四川盆地东部高台组为例

王纪焯, 胡忠贵, 远光辉, 李世临, 张俊, 王文静, 张宸瑜

引用本文:

王纪焯, 胡忠贵, 远光辉, 等. 碳酸盐岩—蒸发岩共生体系沉积特征及演化模式——以四川盆地东部高台组为例[J]. 沉积学报, 2026, 44(1): 201-220.

WANG JiXuan, HU ZhongGui, YUAN GuangHui, et al. Sedimentary Characteristics and Evolutionary Patterns of Carbonatite-Evaporite Syngenetic System: A case study of the Gaotai Formation in eastern Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2026, 44(1): 201-220.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

羌塘盆地晚三叠世岩相古地理特征与烃源岩

Lithofacies Palaeogeography and Source Rock of the Late Triassic in the Qiangtang Basin

沉积学报. 2020, 38(4): 876-885 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.093>

京西地区寒武系凤山组地球化学特征及古环境意义

Geochemical Characteristics and Their Paleoenvironmental Significance for the Cambrian Fengshan Formation in the Western Beijing Area

沉积学报. 2020, 38(3): 661-675 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2020.026>

湘中—湘南烟溪组沉积特征及页岩气勘探潜力

Sedimentary Characteristics and Exploration Potential for Shale Gas in Yanxi Formation, Central and Southern Hunan

沉积学报. 2020, 38(1): 218-230 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.026>

四川盆地寒武统膏盐岩“多湖”沉积模式

“Multiple-lagoon” Sedimentary Model of the Lower Cambrian Gypsum-salt Rocks in the Sichuan Basin

沉积学报. 2019, 37(4): 834-846 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.188>

意大利Mt.Faito地区白垩纪早阿普第期浅水碳酸盐岩沉积微相及其环境演化

Microfacies Analysis of Lower Aptian (Cretaceous) Shallow-water Carbonate in the Mt.Faito Section, Italy

沉积学报. 2019, 37(4): 723-734 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.166>

引用格式:王纪焯,胡忠贵,远光辉,等.2026.碳酸盐岩—蒸发岩共生体系沉积特征及演化模式——以四川盆地东部高台组为例[J].沉积学报,44(1):201-220.

WANG JiXuan, HU ZhongGui, YUAN GuangHui, et al. 2026. Sedimentary Characteristics and Evolutionary Patterns of Carbonatite-Evaporite Syngenetic System: A case study of the Gaotai Formation in eastern Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(1): 201-220.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.024

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2024.024

碳酸盐岩—蒸发岩共生体系沉积特征及演化模式 ——以四川盆地东部高台组为例

王纪焯¹,胡忠贵^{2,3},远光辉¹,李世临⁴,张俊⁵,王文静²,张宸瑜²

1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266000

2. 长江大学地球科学学院, 武汉 430100

3. 长江大学沉积盆地研究中心, 武汉 430100

4. 中国石油西南油气田公司重庆气矿, 重庆 402160

5. 中石化西南石油工程有限公司湖南钻井分公司, 长沙 410119

摘要 【目的】碳酸盐岩—蒸发岩共生体系在四川盆地寒武系广泛分布,然而该共生体系的发育特征、沉积环境、沉积过程和演化模式研究薄弱,研究方法亟待厘清。【方法】以四川盆地东部寒武系高台组为例,基于钻井取心、野外剖面、岩石薄片和碳氧同位素、Fe与Mn含量及S同位素组成等资料,探讨共生体系的岩石学特征,蒸发岩的赋存状态,共生体系的沉积环境及沉积过程和演化模式。【结果】(1)研究区碳酸盐岩—蒸发岩共生体系发育五种碳酸盐岩—蒸发岩共生体系岩石组合序列,包括碳酸盐岩与蒸发岩互层、蒸发岩夹碳酸盐岩、蒸发岩上覆碳酸盐岩、碳酸盐岩上覆蒸发岩和碳酸盐岩夹蒸发岩。(2) $\delta^{13}\text{C}$ 主要集中在 -1.00‰ ~ 3.00‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 主要集中在 -9.00‰ ~ -8.00‰ ,利用碳氧同位素数值计算古盐度及古温度结果表明,绝大多数Z值大于120,且 $\delta^{13}\text{C}$ 值大于 -2.00‰ ,古海水温度介于 $23.10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $40.64\text{ }^{\circ}\text{C}$;Fe主要集中在 $(0\sim 2\ 000)\times 10^{-5}$;Mn主要集中在 $(1\sim 30)\times 10^{-5}$,说明在高台组时期,沉积环境为温暖或炎热的古气候和咸化海水环境,水体氧化程度较高,经历了与大气水有关的相对开放体系中的成岩作用。(3)干旱炎热气候和高盐度富 Ca^{2+} 低 SO_4^{2-} 的“方解石海”的条件背景下,海相碳酸盐岩—蒸发岩共生体系沉积时期可分为海平面下降期蒸发岩—白云岩沉积阶段和海平面上升期白云岩—蒸发岩—灰岩沉积阶段;“潮坪萨布哈模式”和“水下浓缩沉积模式”是碳酸盐岩—蒸发岩共生体系发育的两种模式。【结论】碳酸盐岩—蒸发岩共生体系承载了沉积时期的古环境、古气候以及古海水化学等信息,也记录了共生体系沉积过程和演化模式,该研究为寒武系高台组海相蒸发环境碳酸盐岩—蒸发岩共生体系沉积环境和沉积模式提供了新的思路与认识。

关键词 四川盆地东部;寒武系高台组;碳酸盐岩—蒸发岩共生体系;沉积特征;沉积演化

第一作者 王纪焯,男,1996年出生,博士研究生,碳酸盐岩沉积学及储层地质学,E-mail: 1079299440@qq.com

通信作者 胡忠贵,男,教授,E-mail: hzgj1978@yangtzeu.edu.cn

中图分类号:P512.2 文献标志码:A 文章编号:1000-0550(2026)01-0201-20

0 引言

碳酸盐岩—蒸发岩共生体系在全球范围内广泛分布,其油气储量约占全球碳酸盐岩油气总储量的47%(刘朝全和姜学峰,2017)。碳酸盐岩—蒸发岩共生体系形成的储盖组合在油气勘探中具有重要地位(徐文世等,2005;李勇,2006;Kendall *et al.*,

2009;钟逸斯等,2022)。四川盆地碳酸盐岩—蒸发岩组合主要分布于下三叠统和寒武统(李凌等,2012;王文楷等,2017;Wang *et al.*,2022),众多学者在对上述层位共生体系油气储层的研究中取得了一定的进展和成果,发现了规模不等的气藏。李凌等(2012)分析了四川盆地雷口坡组的碳酸盐岩—蒸发岩共生体系,认为膏盐岩为水下浓缩成因,共生体系

收稿日期:2023-08-03;修回日期:2024-02-02;录用日期:2024-03-07;网络出版日期:2024-03-07

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05007002)

的发育受到了四川盆地构造运动的影响,沉积中心出现迁移;胡安平等(2019)对四川盆地雷口坡组剖面进行研究,认为古气候与碳酸盐岩—膏盐岩沉积体系关系密切,微生物白云岩上覆膏盐岩的岩石组合序列属于优质储层;王纪焯(2023)认为川东及周缘地区寒武系白云岩—蒸发岩共生体系的发育主要受控于三种因素:持续的海退、局限闭塞的古环境和炎热干旱的古气候,建立了共生体系的发育演化模式。在深层超深层的寒武纪地层,共生体系发育的上寒武统洗象池组和下寒武统龙王庙组同样取得了勘探发现和大量研究进展(胡忠贵等,2020;王纪焯等,2024)。但对于碳酸盐岩—蒸发岩共生体系的形成环境、沉积过程和发育模式等关键地质问题,尚缺乏深入和系统的分析研究。因此,开展碳酸盐岩—蒸发岩共生体系的综合研究不仅具有重要的理论意义,而且对四川盆地超深层海相碳酸盐岩油气勘探具有重要的实际意义(胡忠贵等,2020;王纪焯等,2024)。

海相蒸发岩体系最重要的因素是碳酸盐岩与蒸发岩矿物的共同关联(Moore and Wade, 2013)。蒸发岩的赋存状态及其与碳酸盐的联系主要分为两种类型:(1)浸染状蒸发岩在碳酸盐内部(Warren, 2006);(2)与碳酸盐岩伴生的块状蒸发岩。在水位降低或盆地隔离时期,与碳酸盐相关的大块蒸发岩沉积发生在靠近盆地中心的地方,这主要受气候变化和海平面波动的控制(Warren, 2006)。在海侵时期,水体盐度趋于正常,沉积物以碳酸盐岩为主,而在高水位体系域HST或LST的蒸发阶段,盐—石膏岩沉积,由于蒸发导致盐度升高,因此水质量体积减小(Warren, 2010)。Abrantes *et al.* (2016)研究了Parnaíba盆地的二叠纪含石膏矿床。含石膏矿床被解释为内陆sabkha环境中含盐泥滩和含盐盆地的浅湖环境。López-Quirós *et al.* (2016)描述了托尔托尼亚的格拉纳达盆地(西班牙东南)。该研究清楚地表明成岩历史与盆地演化之间的密切联系。成岩过程与主要的地球动力学事件有关,包括导致蒸发岩沉积的盆地约束,以及几个时期的沉降和隆起。

四川盆地东部寒武系高台组沉积时期主要为碳酸盐岩局限台地沉积环境,发育碳酸盐岩与蒸发岩交互的旋回性沉积层,也可称为碳酸盐岩与蒸发岩共生的沉积体系。高台组储集层的非均质性较强,岩性主要为粉细晶白云岩(王纪焯等,2024)。与华

北地块和塔里木地块相比,具有其独特的沉积特征,尤其是其中厚层海相碳酸盐岩与石膏岩类蒸发岩共生的形成,仍缺乏对其成因的明确认识。

以四川盆地东部寒武系高台组为目的层位,在综合分析碳酸盐岩—蒸发岩共生体系岩石学特征的基础上,分析岩石组合序列特征,结合碳氧同位素、Fe与Mn含量及S同位素组成数据,深入探讨共生体系沉积时期的主控因素,并进一步分析共生体系在各种因素影响下的演化模式,以期对高台组碳酸盐岩—蒸发岩共生体系沉积和演化形成规律性认识及对高台组油气资源勘探提供研究思路和理论指导。

1 区域概况

四川盆地东部地区构造位置属于中隆高陡构造区的东部,发育一系列阻挡式褶皱带和隔槽式褶皱带(图1a;胡忠贵等,2020;王纪焯等,2024),包括华蓥山断裂、齐岳山断裂和恩施断裂(图1b)。研究区地层发育较为完整,除泥盆系缺失外,从震旦系到第四系均有发育。其中寒武系、二叠系、三叠系和侏罗系均属于研究区重要的油气储集层系。三叠系的雷口坡组(李凌等,2012;王文楷等,2017)、嘉陵江组和寒武系均存在碳酸盐岩—蒸发岩共生体系的沉积和发育(张琼,2021;Wang *et al.*, 2022),本文主要研究层位为寒武系高台组(图1c)。

研究区高台组沉积时期发育混积台地和碳酸盐局限台地,局部地区为蒸发潟湖相沉积;岩性为一套陆源碎屑岩、碳酸盐岩和蒸发岩共存的沉积组合,因含有紫红色的泥岩、砂岩及白云岩,高台组素有寒武系“上红层”之称(胡忠贵等,2023;王纪焯等,2024)。

2 样品和实验方法

在高台组采集了106块碳酸盐样品,均来自楼探1井,主要包括白云岩、灰岩和石膏岩等碳酸盐岩与蒸发岩类。样品用长江大学地球科学学院实验中心的同位素质谱仪(型号:DELTA V Advantage),依据《有机物和碳酸盐岩碳、氧同位素分析方法》SY/T5238—2008,在温度26℃和湿度60%RH的环境条件下,对74块样品(5450~5960 m)进行碳氧同位素分析(表1),对32块样品(6491~6496 m)测定Fe、Mn微量元素和S同位素组成(表2)。 $\delta^{13}\text{C}$ 误差 $\pm 0.005\%$,

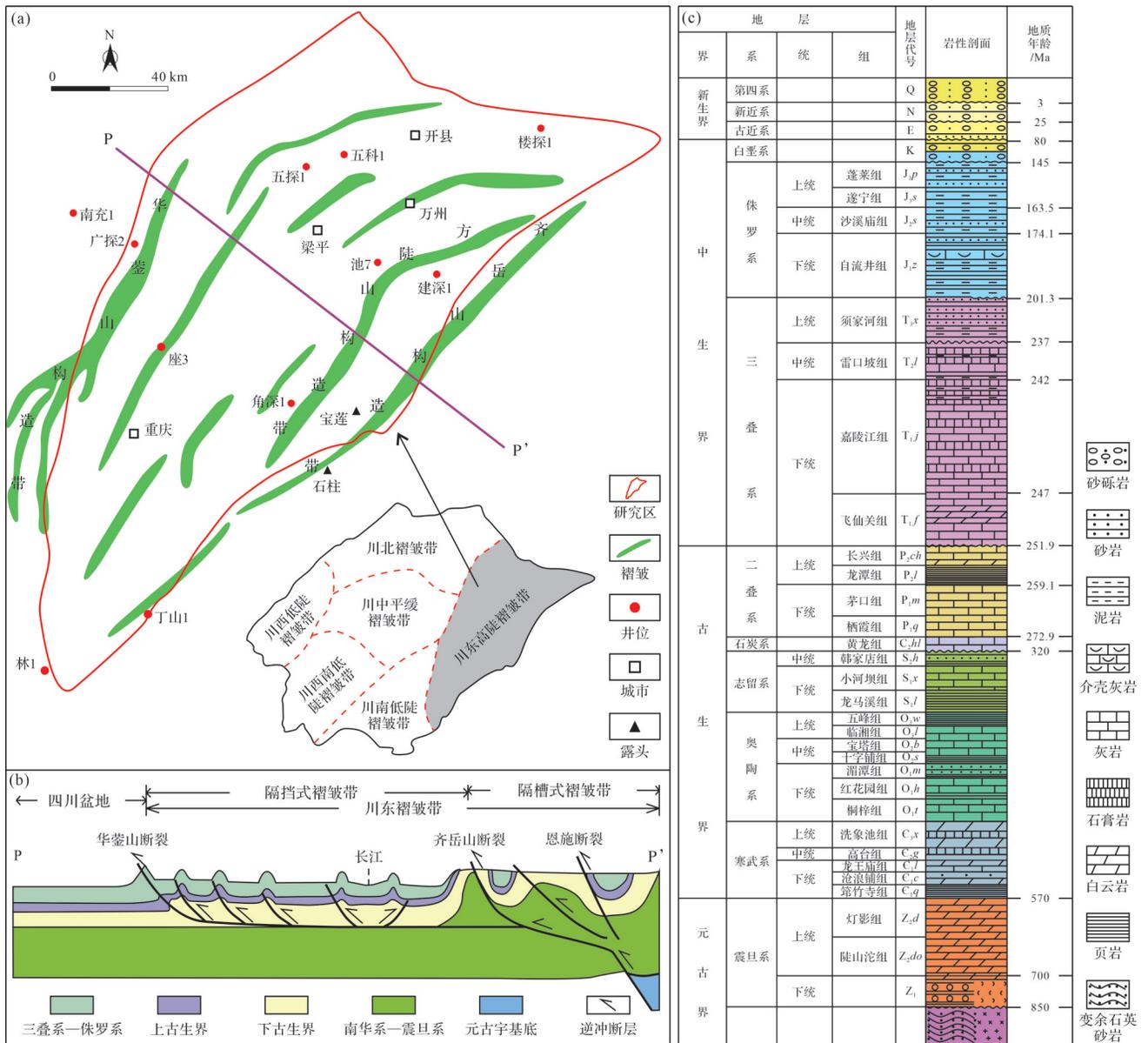


图1 (a) 研究区构造分区图; (b) 研究区构造剖面图 (Yan *et al.*, 2003; 胡召齐等, 2009); (c) 地层综合柱状图 (黄涵宇, 2018)

Fig.1 (a) Tectonic zoning map of the study area; (b) tectonic section of the study area (Yan *et al.*, 2003; Hu *et al.*, 2009); (c) stratigraphic composite bar chart (Huang, 2018)

$\delta^{18}\text{O}$ 误差 $\pm 0.032\text{‰}$, $\delta^{34}\text{S}$ 误差 $\pm 0.05\text{‰}$, Mn 元素分析误差 $\pm 0.003\text{‰}$, Fe 元素误差 $\pm 0.07\text{‰}$ 。

将样品用去离子水冲洗掉矿物表面黏附的泥质等杂质。通过低温烘干后用玛瑙研钵研磨, 将样品过孔径为 $70\ \mu\text{m}$ 的尼龙筛之后, 置于干燥器内干燥并冷却至常温。称取 $0.1\ \text{g}$ 样品, 放入 PTFE 消解内罐中, 加入混合酸, 置于石墨加热器上 $80\ \text{°C}$ 加热。反应结束后, 冷却至常温进行密封, 放入微波消解仪内。根据消解程序, 启动仪器加热。结束后, 将

PTFE 消解内罐置于石墨加热器上, 加入混合酸反复加热至近干。加入 $4\ \text{mL}$ 硝酸, 用纯水稀释定容, 于 ICP-AES 仪器设定的条件下上机测试 (李佳等, 2023)。

3 共生体系沉积特征及沉积过程

3.1 共生体系碳酸盐岩特征

研究区寒武系高台组沉积环境主要为碳酸盐局限台地, 发育混积潮坪、潮坪、潟湖、台内滩沉积亚相

表1 四川盆地东部高台组楼探1井 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素测试、古水体盐度及古温度计算结果
 Table 1 Results of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotope tests, paleohydrological salinity and paleotemperature calculations, well LT1, Gaotai Formation, eastern Sichuan Basin

深度/m	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	Z	温度/ $^{\circ}\text{C}$	深度/m	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	Z	温度/ $^{\circ}\text{C}$
5 450	0.77	-10.53	123.64	35.87	5 665	-0.59	-11.42	120.40	40.65
5 460	0.84	-10.55	123.77	36.02	5 670	-1.86	-10.65	118.20	36.53
5 470	0.61	-10.34	123.41	34.89	5 675	-0.08	-9.87	122.23	32.50
5 480	0.42	-10.17	123.10	34.00	5 680	-0.31	-9.62	121.87	31.21
5 490	1.42	-9.21	125.61	29.20	5 685	-3.98	-9.15	114.60	28.89
5 500	1.57	-8.75	126.15	26.96	5 690	-2.44	-9.68	117.47	31.55
5 510	1.37	-9.46	125.39	30.41	5 695	-2.81	-10.16	116.49	33.96
5 520	1.26	-9.90	124.95	32.65	5 700	-0.29	-9.22	122.11	29.25
5 530	1.24	-9.85	124.93	32.39	5 705	-1.09	-10.01	120.07	33.22
5 540	1.12	-10.00	124.61	33.13	5 710	-0.65	-8.33	121.82	24.99
5 550	1.59	-9.61	125.77	31.20	5 715	0.10	-8.56	123.25	26.06
5 560	1.84	-8.97	126.61	28.00	5 720	0.57	-9.14	123.92	28.87
5 570	1.79	-8.89	126.53	27.63	5 725	2.44	-8.92	127.85	27.79
5 575	1.55	-8.97	126.02	28.02	5 730	3.38	-7.93	130.27	23.11
5 580	1.79	-9.37	126.31	29.96	5 740	3.55	-8.99	130.09	28.13
5 585	1.62	-9.28	125.99	29.52	5 750	3.91	-8.44	131.11	25.48
5 590	1.52	-9.04	125.92	28.35	5 760	3.83	-9.00	130.67	28.15
5 595	1.11	-9.35	124.92	29.86	5 770	3.46	-8.91	129.95	27.74
5 600	-1.00	-9.45	120.54	30.39	5 780	3.30	-8.79	129.67	27.18
5 602	-0.87	-8.95	121.06	27.93	5 790	3.43	-9.48	129.61	30.52
5 605	0.33	-9.05	123.46	28.40	5 800	3.34	-8.63	129.85	26.37
5 608	0.80	-9.29	124.31	29.59	5 810	3.17	-8.92	129.34	27.78
5 611	-1.08	-9.80	120.20	32.13	5 820	2.71	-8.73	128.49	26.89
5 614	-1.43	-10.39	119.19	35.17	5 830	3.31	-9.26	129.47	29.43
5 617	-0.62	-10.09	121.00	33.60	5 840	3.50	-9.71	129.63	31.68
5 620	0.05	-10.24	122.30	34.39	5 850	3.41	-9.36	129.63	29.92
5 623	2.35	-9.19	127.53	29.11	5 860	3.16	-9.49	129.05	30.59
5 626	1.65	-9.28	126.05	29.52	5 870	2.52	-10.01	127.47	33.20
5 629	1.43	-9.47	125.52	30.49	5 880	3.83	-9.47	130.42	30.49
5 632	2.44	-8.94	127.84	27.89	5 890	3.50	-9.57	129.69	30.98
5 635	2.75	-8.92	128.49	27.77	5 900	3.10	-9.48	128.93	30.52
5 638	2.53	-9.38	127.80	30.02	5 910	3.87	-9.29	130.60	29.60
5 640	3.10	-8.79	129.27	27.17	5 920	3.28	-9.40	129.33	30.15
5 645	2.62	-9.37	128.01	29.98	5 930	3.75	-9.57	130.21	30.95
5 650	1.81	-9.53	126.26	30.75	5 940	3.18	-9.50	129.08	30.63
5 655	-1.39	-11.26	118.84	39.80	5 950	3.05	-9.31	128.91	29.66
5 660	-0.65	-11.30	120.35	40.03	5 960	2.73	-10.13	127.84	33.81

表2 四川盆地东部高台组Fe、Mn含量及S同位素组成($\delta^{34}\text{S}$)数据表Table 2 Fe and Mn contents and S isotopic composition ($\delta^{34}\text{S}$) in the Gaotai Formation, eastern Sichuan Basin

编号	Fe/ $\times 10^{-5}$	Mn/ $\times 10^{-5}$	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	编号	Fe/ $\times 10^{-5}$	Mn/ $\times 10^{-5}$	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$
2-1/43	1 124.10	25.36	16.8	2-17/43	436.27	16.88	20.7
2-2/43	1 182.95	31.81	17.5	2-18/43	992.22	26.93	18.9
2-3/43	904.03	15.57	16.9	2-19/43	735.95	21.86	13.6
2-4/43	731.96	16.54	15.4	2-20/43	2 669.85	39.22	19.7
2-5/43	366.39	13.71	15.9	2-21/43	3 033.10	43.99	19.0
2-6/43	624.55	18.07	19.7	2-22/43	775.70	21.41	21.4
2-7/43	1 579.77	22.12	19.1	2-23/43	770.08	20.99	21.0
2-8/43	1 773.30	29.82	20.4	2-24/43	2 322.22	30.13	21.5
2-9/43	882.04	24.07	18.1	2-25/43	896.81	18.92	21.3
2-10/43	1 371.28	24.82	19.2	2-26/43	5 459.62	40.54	20.6
2-11/43	1 118.43	23.89	14.7	2-27/43	6 042.42	45.15	25.3
2-12/43	1 356.67	23.23	15.2	2-28/43	2 390.19	33.91	22.9
2-13/43	1 532.21	26.75	17.2	2-29/43	801.39	24.70	21.6
2-14/43	686.85	19.39	20.3	2-31/43	1 908.15	20.20	20.6
2-15/43	2 077.47	30.83	20.7	2-37/43	—	—	—
2-16/43	990.89	26.03	21.0	2-43/43	6 352.09	17.85	20.4

(胡忠贵等, 2023; 王纪焯等, 2024)。与石膏岩共生的碳酸盐岩主要包括泥晶灰岩和泥晶白云岩。钻井岩心薄片和剖面露头薄片资料表明, 研究区寒武系高台组晶粒较细的泥晶级的碳酸盐岩均有石膏赋存, 赋存状态以石膏胶结物和石膏晶体为主(图2, 3)。

与石膏岩共生的泥晶级灰岩主要包括含石膏泥晶砂屑灰岩(图2a, b)、泥晶灰岩(图2c)、泥晶白云质灰岩(图2d)、含石膏泥晶白云灰岩(图2e)和石膏质泥晶藻砂屑灰岩(图2f)。

与石膏岩共生的白云岩以泥晶级白云岩为主, 含少量的细粉晶白云岩, 主要包括细粉晶白云岩(图2g, h)、含石膏泥晶白云岩(图2i, j)、石膏质白云岩(图2k)和含石膏砂屑白云岩(图2l)。

3.2 共生体系蒸发岩特征

研究区蒸发岩以石膏岩为主, 发育少量盐岩。蒸发岩及赋存的围岩具有块状构造和平行层理构造, 填隙物多以碳酸盐泥、白云石胶结、方解石胶结和石膏胶结为主。镜下观察到石膏团块的分选较差, 磨圆以次棱一次圆状为主, 基于蒸发岩的赋存特征和围岩状态分为四类(表3), 主要包括厚层状盐岩, 层状石膏岩, 石膏团块, 石膏胶结物(图3)。

3.3 共生体系岩石组合序列特征

根据前人划分共生体系岩性组合序列方法对研究区进行研究(胡忠贵等, 2023), 认为四川盆地东部高台组发育五种碳酸盐岩—蒸发岩共生体系岩石组

合序列(表4、图4), 包括碳酸盐岩与蒸发岩互层(A)、蒸发岩夹碳酸盐岩(B)、蒸发岩上覆碳酸盐岩(C)、碳酸盐岩上覆蒸发岩(D)、碳酸盐岩夹蒸发岩(E)。

碳酸盐岩与蒸发岩互层(A): 是研究区共生体系中常见的一种, 蒸发岩或碳酸盐岩的厚度在两者厚度总和的40%~60%, 岩性主要包括石膏岩、白云质石膏岩、泥晶白云岩、粉晶白云岩和石膏质白云岩。

蒸发岩夹碳酸盐岩(B): 蒸发岩厚度大于两者厚度总和的80%, 碳酸盐岩厚度小于两者厚度总和的80%, 岩性主要包括石膏质白云岩、石膏岩、盐岩、白云质石膏岩和泥晶白云岩。

蒸发岩上覆碳酸盐岩(C): 岩性主要包括, 砂砾屑白云岩、鲕粒白云岩、粉晶白云岩、鲕粒灰岩、石膏岩、白云质石膏岩和白云质灰岩。

碳酸盐岩上覆蒸发岩(D): 岩性主要包括泥晶白云岩、石膏岩、鲕粒白云岩、砂屑白云岩、白云质石膏岩和石膏质白云岩。

碳酸盐岩夹蒸发岩(E): 碳酸盐岩厚度大于两者厚度总和的80%, 蒸发岩厚度小于两者厚度总和的80%, 岩性主要包括泥晶白云岩、石膏质白云岩、砂屑白云岩、石膏岩、砂质白云岩和白云质石膏岩。

依据岩性组合、测井曲线及前人成果在高台组三级层序内划分出6个四级层序(SSQ1~SSQ6), 在层序格架内对共生体系岩石组合序列类型进行了划分(图5), 并结合相关资料编制了层序格架内岩石组合序列的平面展布图(图6)。

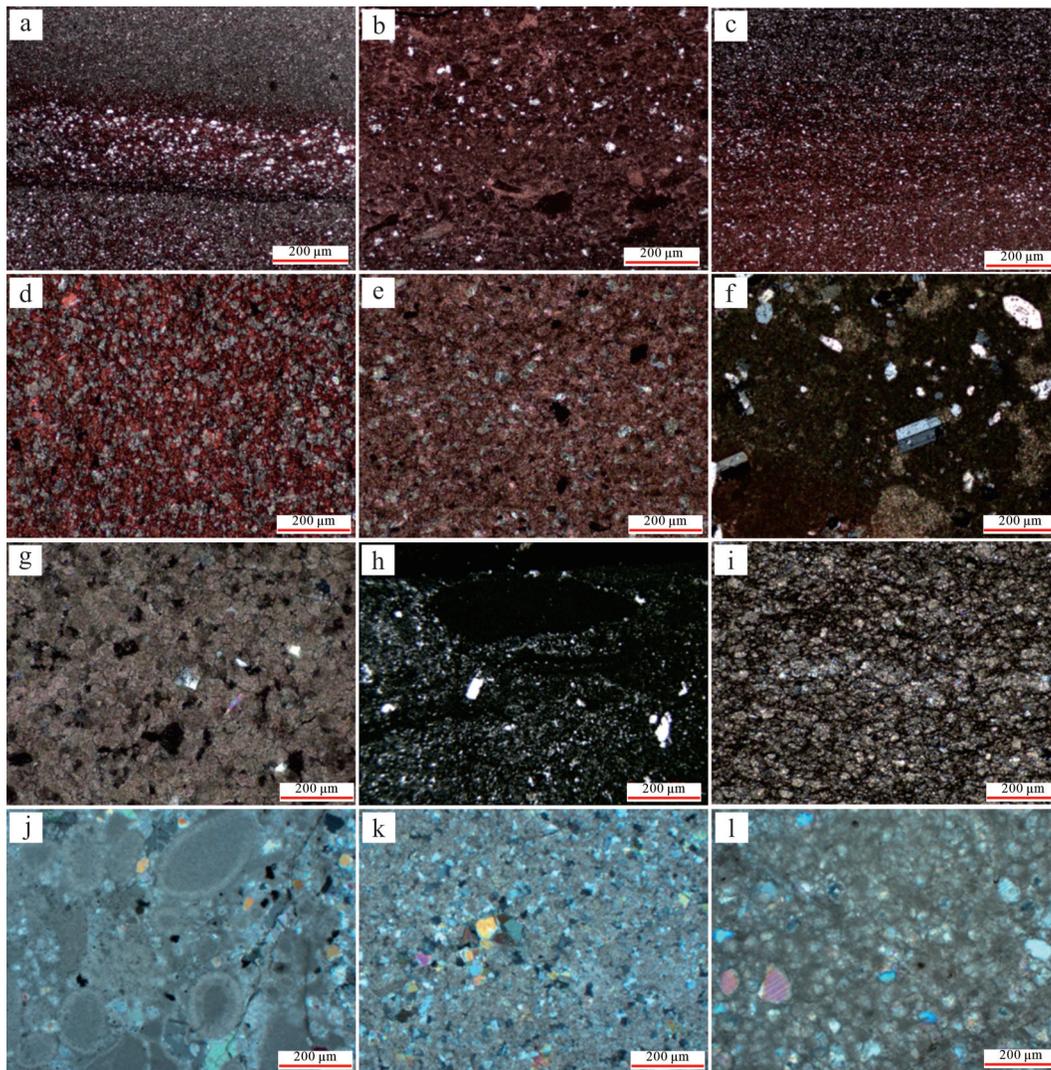


图2 碳酸盐岩—蒸发岩共生体系白云岩镜下特征

(a)含石膏泥晶砂屑灰岩,楼探1井,6 490.97 m,10×2.5(-);(b)含石膏泥晶砂屑灰岩,偶见海百合茎,楼探1井,6 491.16 m,10×2.5(-);(c)泥晶灰岩、粉砂质灰岩、粉晶白云岩三种岩性互层,楼探1井,6 492.07 m,10×2.5(-);(d)泥晶白云质灰岩,楼探1井,6 492.32 m,10×10(+);(e)含石膏泥晶白云灰岩,楼探1井,6 492.57 m,10×10(+);(f)石膏质泥晶藻砂屑灰岩,石柱宝莲飞水洞剖面,17小层,10×5(+);(g)细粉晶白云岩,五探1井,6 864.00 m,10×10(+);(h)泥质细粉晶白云岩,含石膏,楼探1井,6 494.58 m,10×10(+);(i)含石膏泥晶白云岩,见泥质条纹及泥砾,石柱宝莲飞水洞剖面,32小层,GT81-1-2,10×5(-);(j)含石膏粉砂质泥晶白云岩,座3井,5 833.00 m,10×5(+);(k)石膏质白云岩,猫1井,4 740.00 m,10×5(+);(l)含石膏砂屑白云岩,主要由泥晶白云岩砂屑构成,局部见鲕粒,座3井,5 708.00 m,10×5(+)

Fig.2 Photomicrographs of dolomite in the carbonate-evaporite syngenetic system

(a) gypsum-bearing mud-crystalline sandy chert, well LT1, 6 490.97 m, 10×2.5 (-); (b) gypsum-bearing mud-crystalline sandy chert, with occasional sea lily stems, well LT1, 6 491.16 m, 10×2.5 (-); (c) mud-crystalline chert, silty sandy chert, and silty dolomite with three kinds of interbedded lithology, well LT1, 6492.07 m, 10×2.5 (-); (d) mud-crystalline dolomitic chert, well LT1, 6 492.32 m, 10×10 (+); (e) mud-crystalline dolomitic chert, well LT1, 6 492.32 m, 10×10 (-); (f) gypsum-bearing mud-crystalline algal sandy clastic greywacke, Shijiu Baolian Feishuidong section, 17 small layers, 10×5 (+); (g) fine chalk-crystalline dolomite, well WT1, 6 864.00 m, 10×10 (+); (h) muddy fine powder-crystal dolomite with gypsum, well LT1, 6 494.58 m, 10×10 (+); (i) gypsum-bearing mud-crystal dolomite, with muddy streaks and mud gravels seen, Shijiu Baolian Feishuidong section, 32 small layers, GT81-1-2, 10×5 (-); (j) gypsum-bearing siltstone mud-crystal dolomite, well Z3, 5 833.00 m, 10×5 (+); (k) gypsiferous dolomite, well M1, 4 740.00 m, 10×5 (+); (l) gypsum-bearing sandy dolomite, mainly composed of mud-crystalline dolomite sandy clasts, with oolites locally seen, well Z3, 5 708.00 m, 10×5 (+)

研究表明,SSQ1沉积时期,碳酸盐岩与蒸发岩互层分布在研究区北部,单个组合序列的厚度和规模均较小,碳酸盐岩夹蒸发岩呈带状分布在研究区东部;SSQ2沉积时期,蒸发岩上覆碳酸盐岩分布在研究区东北部,碳酸盐岩夹蒸发岩分布在研究区东北部和南部;SSQ3沉积时期,蒸发岩夹碳酸盐岩分

布在研究区东部,厚度和规模均较大,碳酸盐岩与蒸发岩互层分布在研究区内部,碳酸盐岩夹蒸发岩分布在研究区东北部;SSQ4沉积时期,蒸发岩上覆碳酸盐岩在研究区内广泛分布,厚度和规模均较大,东北部发育规模和厚度较小的碳酸盐岩与蒸发岩互层;SSQ5沉积时期,碳酸盐岩与蒸发岩互

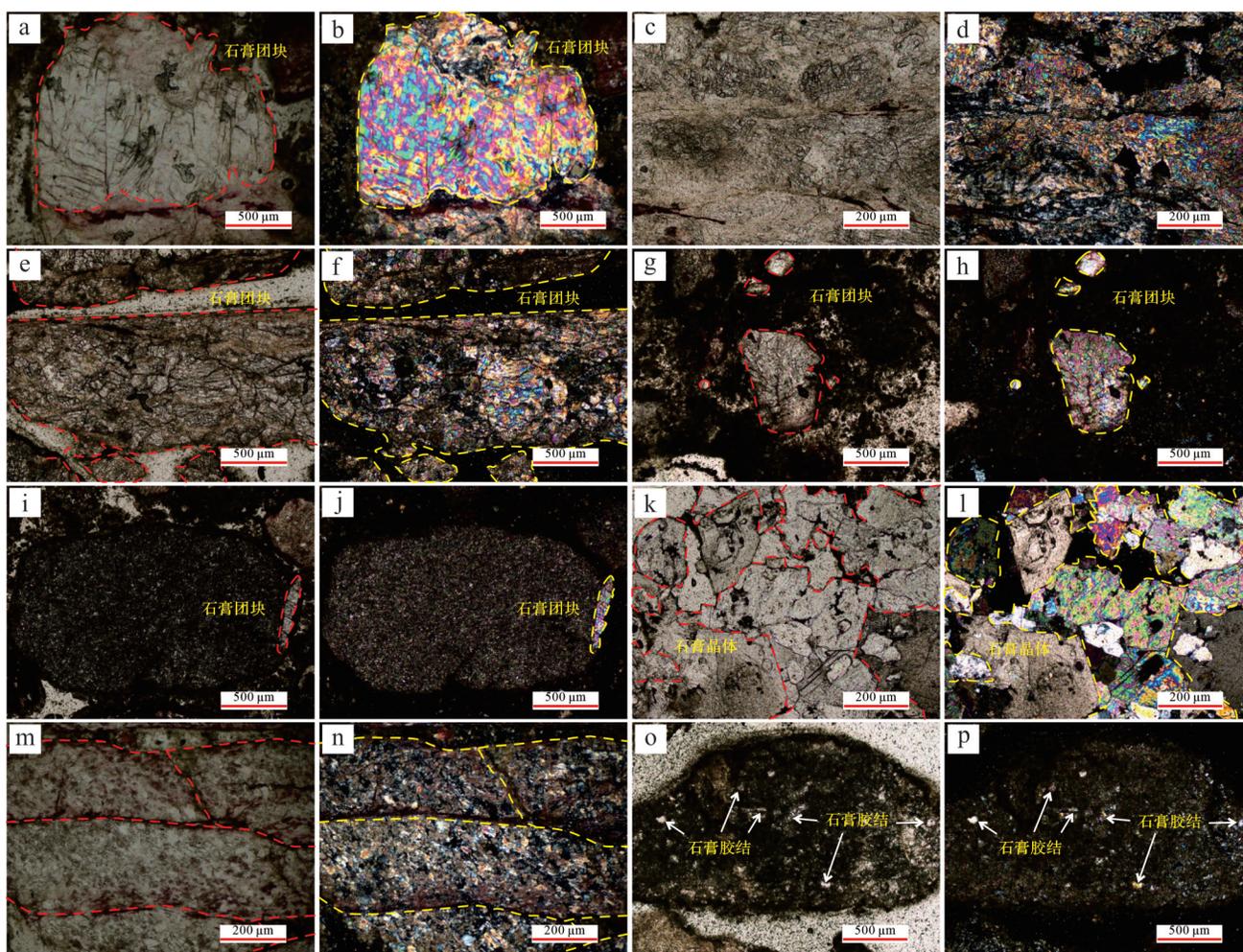


图3 碳酸盐岩—蒸发岩共生体系蒸发岩镜下特征

(a, b)石膏岩,楼探1井,5 965.00 m;(c, d)石膏岩,楼探1井,5 595.00 m;(e, f)石膏岩,楼探1井,6 763.00 m;(g, h)石膏岩,磨空严重,楼探1井,5 670.00 m;(i, j)含石膏泥晶白云岩,仅剩一颗岩屑,楼探1井,5 665.00 m;(k, l)石膏质泥晶白云岩,部分较大的石膏晶体间见晶间孔,也见较大晶体的白云石,楼探1井,5 602.00 m;(m, n)含白云石膏岩/石膏岩,楼探1井,6 558.00 m;(o, p)含石膏泥晶白云岩,楼探1井,6 435.00 m

Fig.3 Photomicrographs of evaporites in the carbonatite-evaporite syngenetic system

(a, b) gypsum, well LT1, 5 965.00 m; (c, d) gypsum, well LT1, 5 595.00 m; (e, f) gypsum, well LT1, 6 763.00 m; (g, h) gypsum with severe grinding voids, well LT1, 5 670.00 m; (i, j) gypsum-bearing mud-crystalline dolomite, with single remaining rock chip, well LT1, 5 665.00 m; (k, l) gypsum-bearing mud-crystalline dolomite, with larger intergranular pores between gypsum crystals and also larger crystals of dolomite, well LT1, 5 602.00 m; (m, n) gypsum-bearing dolomite/gypsum, well LT1, 6 558.00 m; (o, p) gypsum-bearing mud-crystalline dolomite, well LT1, 6 435.00 m

表3 碳酸盐岩—蒸发岩共生体系岩石特征划分表

Table 3 Characterization of the carbonate-evaporite syngenetic system

赋存状态	石膏特征			围岩特征			
	粒径/cm	磨圆	分选	沉积构造	岩性	分选	沉积构造
厚层状	>5	棱角状	差	块状构造	—	—	—
层状	0.01~5	棱角状	中	平行层理	泥晶白云岩	好	平行层理
团块状	<0.01	次棱—次圆	好	—	泥晶白云岩	较好	平行层理
胶结物	—	—	—	—	泥晶白云岩	中	平行层理

层、蒸发岩夹碳酸盐岩和蒸发岩上覆碳酸盐岩呈星点状分布于研究区的东部、南部和北部;SSQ6沉积时期,碳酸盐岩与蒸发岩互层和碳酸盐岩上覆蒸发岩呈星点状分布于研究区的内部,碳酸盐岩

夹蒸发岩呈带状分布在研究区东部。总体上,四川盆地东部高台组碳酸盐岩—蒸发岩共生体系岩石组合序列在平面上均表现出东北—西南向的展布特征。

表4 碳酸盐岩—蒸发岩共生体系岩石组合序列特征划分表

Table 4 Classification of sequence characteristics for carbonate-evaporite rock assemblages

岩石组合序列	蒸发岩	碳酸盐岩
碳酸盐岩与蒸发岩互层(A)	石膏岩、白云质石膏岩	泥—粉晶白云岩、石膏质白云岩
蒸发岩夹碳酸盐岩(B)	石膏岩、盐岩、白云质石膏岩	石膏质白云岩、泥晶白云岩
蒸发岩上覆碳酸盐岩(C)	石膏岩、白云质石膏岩	砂砾屑白云岩、鲕粒白云岩、粉晶白云岩、鲕粒灰岩、白云质灰岩
碳酸盐岩上覆蒸发岩(D)	石膏岩、白云质石膏岩	泥晶白云岩、鲕粒白云岩、砂屑白云岩、石膏质白云岩
碳酸盐岩夹蒸发岩(E)	石膏岩、白云质石膏岩	泥晶白云岩、石膏质白云岩、砂屑白云岩、砂质白云岩

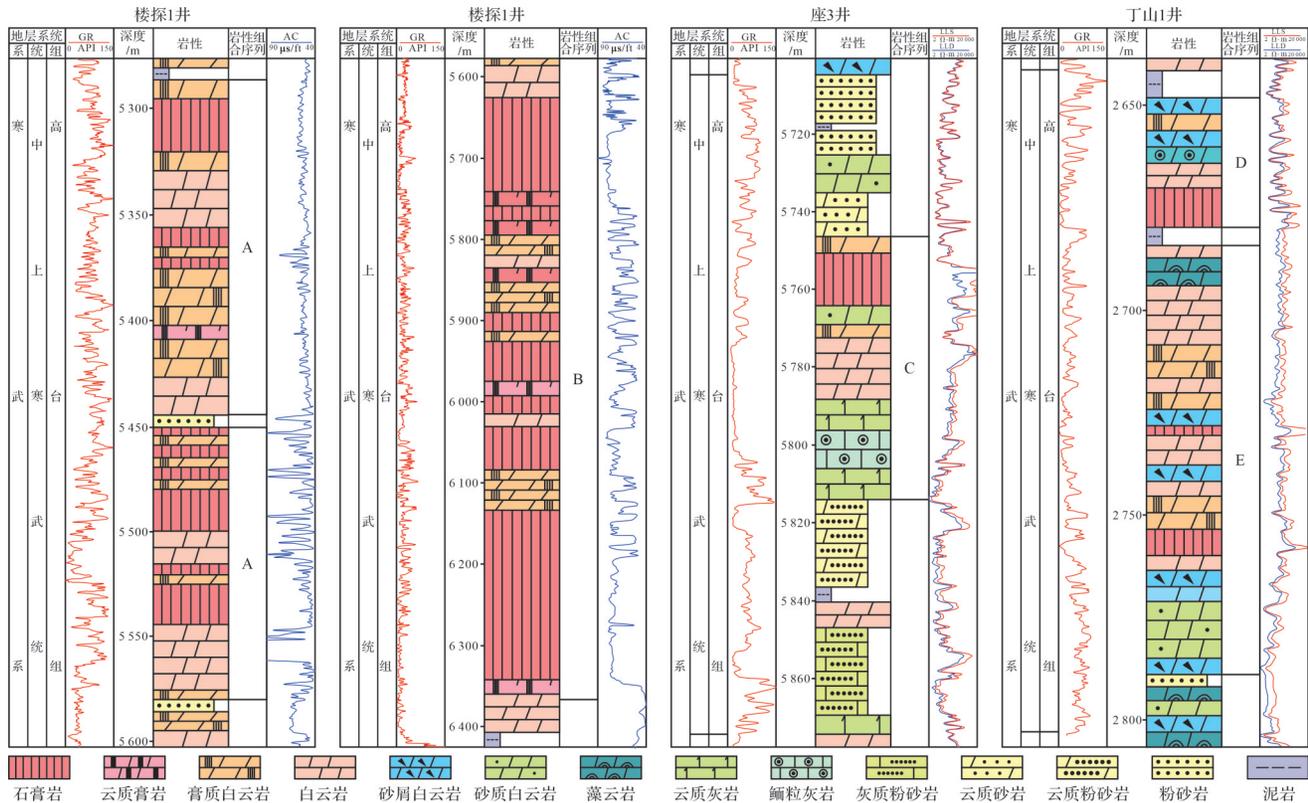


图4 碳酸盐岩—蒸发岩共生体系岩石组合序列

A. 碳酸盐岩与蒸发岩互层; B. 蒸发岩夹碳酸盐岩; C. 蒸发岩上覆碳酸盐岩; D. 碳酸盐岩上覆蒸发岩; E. 碳酸盐岩夹蒸发岩

Fig.4 Assemblages of carbonate-evaporite syngenetic system

A. carbonatite interbedded with evaporite; B. evaporite interbedded with carbonatite; C. evaporite overlying carbonatite; D. carbonatite overlying evaporite; E. carbonatite interbedded with evaporite

4 共生体系地球化学特征及地质意义

4.1 碳氧同位素特征及地质意义

古老的碳酸盐岩在后生作用的过程中会由于成岩蚀变作用对沉积时期的海水信息造成影响,导致氧同位素降低(曲长胜等,2017)。当 $\delta^{18}O < -5\text{‰}$ 时,样品保留的原始数据部分受到破坏; $\delta^{18}O < -10\text{‰}$ 时,样品保留的原始数据已基本不能使用(Kaufman and Knoll, 1995; Zhu *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2009),所以使用数据时排除 $\delta^{18}O < -10\text{‰}$ 的样品数据。根据碳氧同位素的相关性也可以判断保留的原始海水信息是否受到了成岩蚀变的破坏(Horacek *et al.*, 2007):即

若碳氧同位素存在相关性,则数据无效;若碳氧同位素相关性较差,则说明样品受到成岩蚀变的破坏较小,数据有效。

高台组样品碳氧同位素测试结果显示(表1), $\delta^{18}O$ 值介于 $-11.42\text{‰} \sim -7.93\text{‰}$ (共15个样品低于 -10‰),平均值为 -9.47‰ ,主要介于 $-9.00\text{‰} \sim -8.00\text{‰}$ (图7a),表明样品的 $\delta^{18}O$ 数据有效。 $\delta^{13}C$ 值介于 $-3.98\text{‰} \sim 3.91\text{‰}$,平均值为 1.45‰ ,主要介于 $-1.00\text{‰} \sim 3.00\text{‰}$ (图7a)。同时,碳氧同位素数据的相关性较差,相关系数为0.024 9(图7b),说明所选样品略微遭受成岩蚀变,但仍具有代表性,其携带信息有效可用。

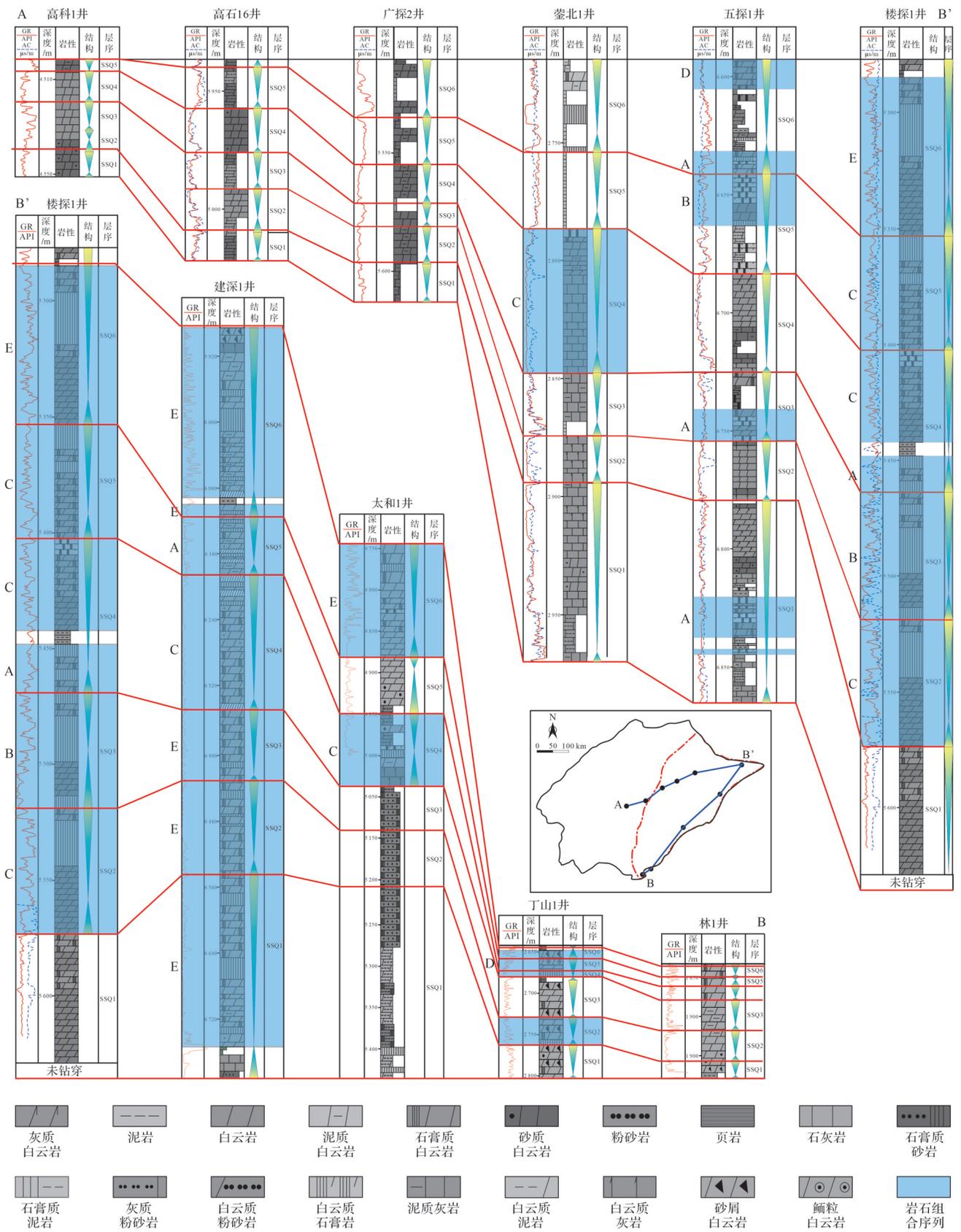


图5 碳酸盐岩—蒸发岩共生体系连井特征

Fig.5 Characteristics of connected wells in the carbonate-evaporite syngenetic system

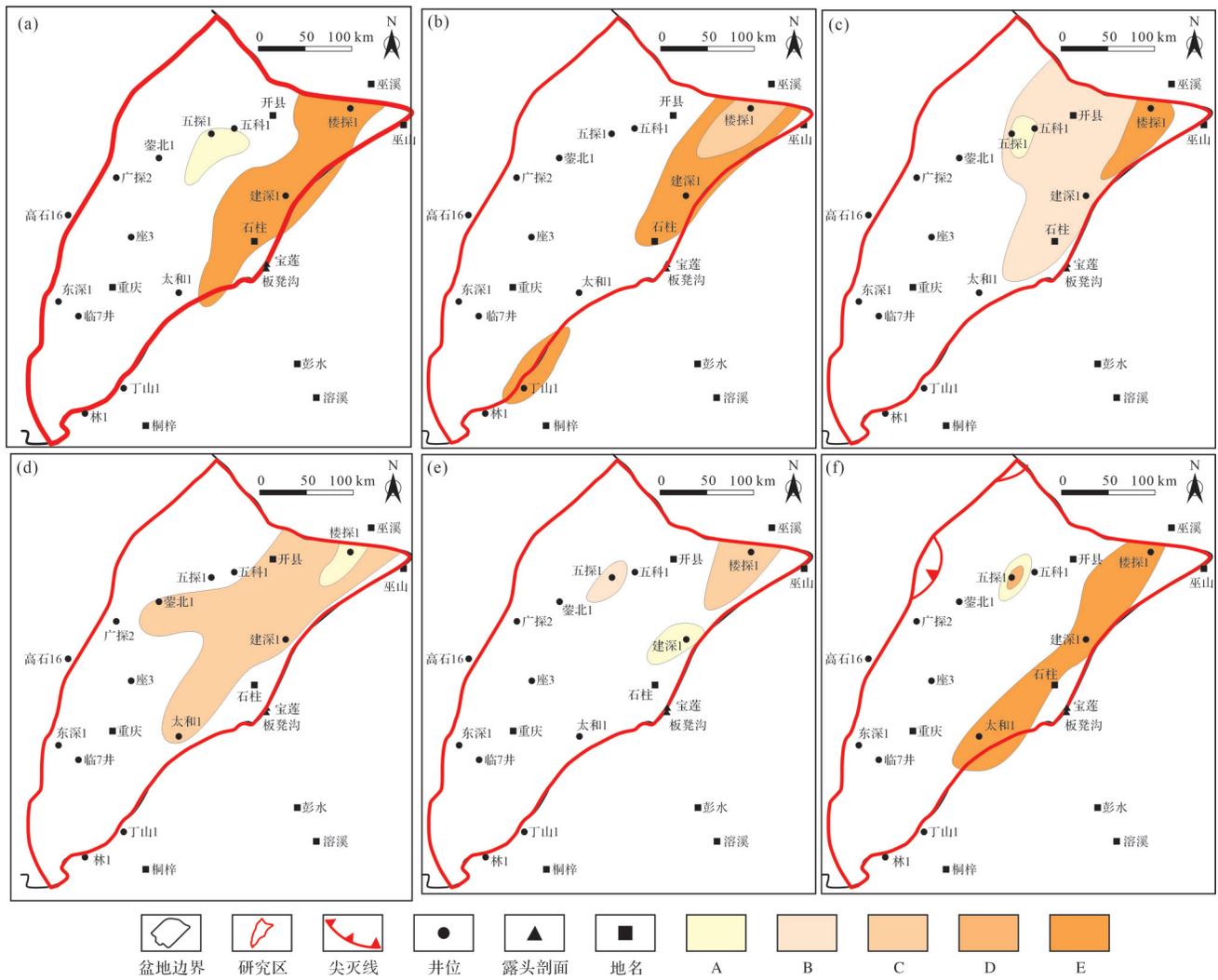


图6 碳酸盐岩—蒸发岩共生体系平面特征

Fig.6 Planar characteristics of the carbonate-evaporite syngenetic system

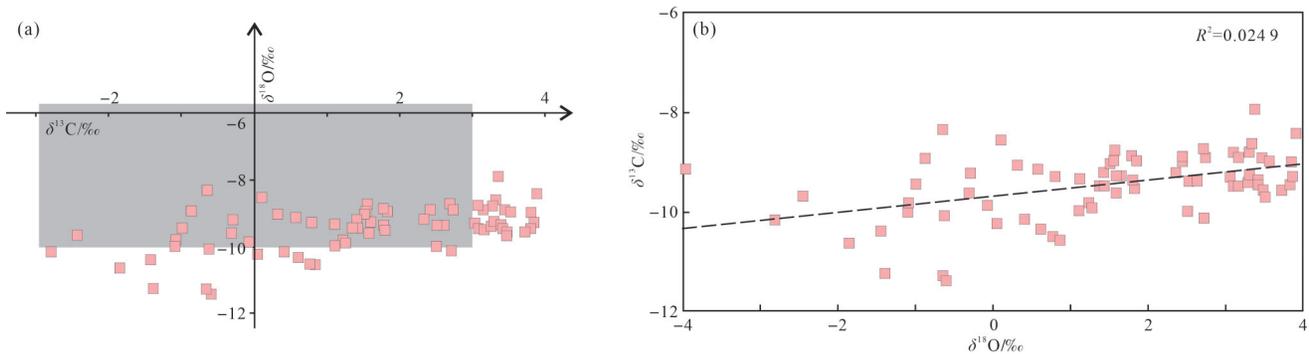


图7 四川盆地东部高台组碳酸盐岩—蒸发岩碳氧同位素值关系图

Fig.7 Carbonate-evaporite C and O isotope relationship, Gaotai Formation, eastern Sichuan Basin

1) 古盐度分析

前人研究表明,原始海水盐度的增加会造成 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值的增加 (Clayton and Epstein, 1958; Clayton and Degens, 1959), 结合前人对碳氧同位素与盐度间的盐度指数 (Z) 计算公式 (Li *et al.*, 2009):

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

即当 $Z > 120$ 时, 为海相碳酸盐岩; $Z < 120$ 时, 为陆相碳酸盐岩 (Keith and Weber, 1964; 陈荣坤, 1994; 罗顺社和汪凯明, 2010)。四川盆地东部高台组古盐度 Z 值计算结果见表 3, 其变化曲线与 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化曲线

相似,相关系数为0.994 4(图8)。Z值介于114.60~130.67,平均值为125.55,绝大多数Z值高于120,且 $\delta^{13}\text{C}$ 值大于 -2‰ ,说明四川盆地东部高台组沉积期整体处于陆表海环境,当时主要环境为盐度较大的海水—咸化海水环境。

2) 古温度分析

原始海水温度对碳酸盐岩碳氧同位素有重要影响(陈荣坤,1994;杜洋等,2016),温度对 $\delta^{18}\text{O}$ 值影响较大,结合前人对氧同位素与古温度间的温度指数(T)计算公式(罗贝维等,2013):

$$T=16.9-4.2(\delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3\text{校正}}+0.22)+0.13(\delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3\text{校正}}+0.22)^2 \quad (2)$$

通过以第四纪海相碳酸盐岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值 -1.2‰ 为标准进行年代校正($\delta^{18}\text{O}$ 平均值 $-(-1.2\text{‰})=\delta^{18}\text{O}$),用实测值与年代校正中 $\delta^{18}\text{O}$ 值相减,即可得到公式中的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3\text{校正}}$ 。结果显示高台组古海水温度介于 $23.10\text{ }^\circ\text{C}\sim 40.64\text{ }^\circ\text{C}$,平均温度为 $30.54\text{ }^\circ\text{C}$,表明高台组沉积时期研究区为温暖或炎热的古气候。

4.2 Fe、Mn元素和S同位素地球化学特征与地质意义

4.2.1 Fe、Mn量元素地球化学特征与地质意义

海相碳酸盐岩中的Fe、Mn质量分数与成岩作用强度和埋藏深度相关(Meng *et al.*, 2019)。Fe、Mn质量分数越高,埋藏越浅,成岩作用强度越低。高台组样品Fe、Mn微量元素数据显示(表2、图9),Fe值分布在 $366.39\times 10^{-5}\sim 6\ 352.09\times 10^{-5}$,平均值为 $1\ 766.65\times 10^{-5}$,主要介于 $0\sim 2\ 000\times 10^{-5}$;Mn值分布在 $13.71\times 10^{-5}\sim 45.15\times 10^{-5}$,平均值为 25.26×10^{-5} ,主要介于 $10^{-5}\sim 30\times 10^{-5}$ 。

四川东北长兴组—飞仙关组碳酸盐岩中的

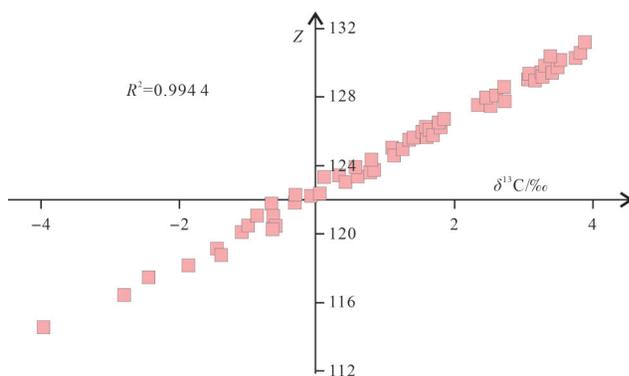


图8 四川盆地东部高台组碳酸盐岩—蒸发岩 $\delta^{13}\text{C}$ -Z值关系图

Fig.8 $\delta^{13}\text{C}$ vs. Z in carbonatite-evaporites, Gaotai Formation, eastern Sichuan Basin

Fe、Mn质量分数平均值为 55.64×10^{-5} 和 6.10×10^{-5} (马永生,2015);塔北地区寒武系下丘里塔格群碳酸盐岩中除缝洞充填物的Fe、Mn质量分数平均值为 $161.736\ 5\times 10^{-5}$ 和 $9.122\ 1\times 10^{-5}$ (李斌等,2019);川中南部寒武系碳酸盐岩中Fe、Mn质量分数平均值分别为 650.29×10^{-5} 和 46.83×10^{-5} (图10a;刘丽红等,2017)。四川盆地东部高台组碳酸盐岩铁和锰质量分数具有比川东北长兴组—飞仙关组、塔北地区寒武系下丘里塔格群更高的特征;四川盆地东部高台组碳酸盐岩铁质量分数高于四川盆地中南部寒武系白云岩,锰质量分数略低,显示研究区高台组碳酸盐岩—蒸发岩共生体系经历了与大气水有关的相对开放体系中的成岩作用。研究区高台组碳酸盐岩—蒸发岩具有与川中南部寒武系碳酸盐岩相近的微量元素组成,说明其经历了相似的成岩作用过程。在表生暴露环境下的萨布哈模式下,受到大气降水的影响,沉积水体具有相对较高的Fe、Mn质量分数(表2、图10a)。

4.2.2 S同位素地球化学特征与地质意义

此次获得四川盆地东部高台组碳酸盐岩—蒸发岩共生样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 $13.6\text{‰}\sim 25.3\text{‰}$,平均值为 19.3‰ ,主要介于 $16.0\text{‰}\sim 21.0\text{‰}$ (表2、图9)。最大值和最小值相差 11.7‰ ,说明其物质来源或沉积环境波动较大(李庆宽等,2018;赵海彤等,2018;郑希民等,2019)。同期寒武系海水 $\delta^{34}\text{S}$ 的数值在 30‰ 至 45‰ 之间波动(Meng *et al.*, 2019),研究区 $\delta^{34}\text{S}$ 值明显小于缺氧环境中海水的 $\delta^{34}\text{S}$ 值和其他同期盆地碳酸盐岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 值,且仅有一个值大于 25‰ (图10b),表明高台组形成过程中,水体的氧化程度较高,厌氧细菌的还原作用微弱,其对石膏硫同位素的分馏作用贡献甚微。研究区碳酸盐岩—蒸发岩共生体系主体发育于“红层”中,反映沉积环境的氧化还原电位较高,不利于硫酸盐还原菌的生存,这种开放的沉积环境体现了共生体系沉积期盆地规模大、物源为海水的特征,同时受到大气降水加强水体氧化的影响。这可能就是研究区 $\delta^{34}\text{S}$ 值相对较低的原因。

5 共生体系沉积过程及演化模式

5.1 共生体系沉积过程

通过对研究区20口钻井高台组碳酸盐岩与蒸发岩薄片观察,基于碳酸盐岩与蒸发岩的组合形式和蒸发岩的不同赋存状态,通过对碳酸盐岩—蒸发岩共生体系地球化学特征及地质意义进行研究,分析

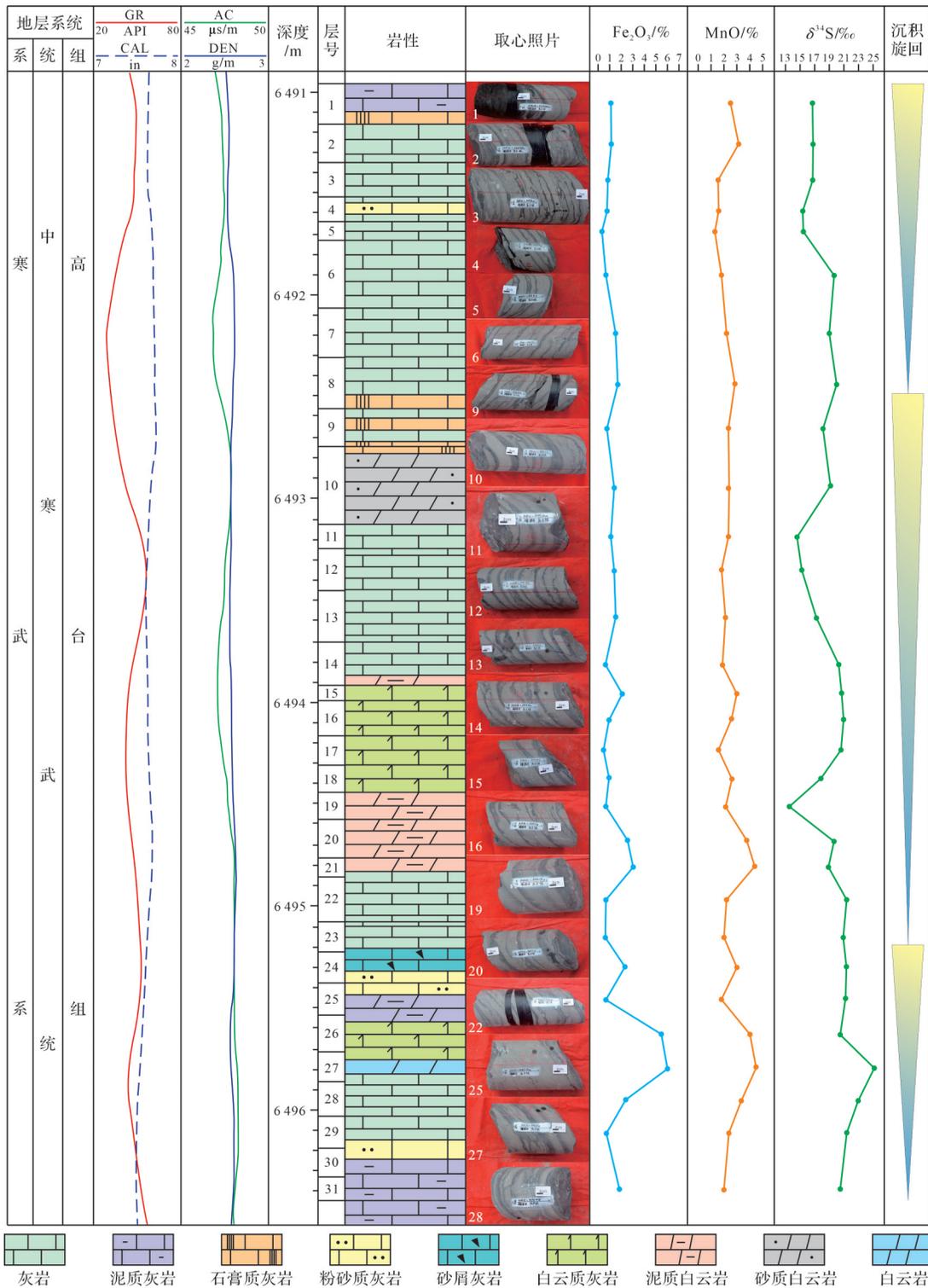


图9 四川盆地东部高台组楼探1井Fe、Mn含量及S同位素组成(δ³⁴S)特征

Fig.9 Characteristics of Fe and Mn contents and S isotopic composition (δ³⁴S) in the well LT1, Gaotai Formation, eastern Sichuan Basin

沉积过程与演化模式。前人认为共生体系中的碳酸盐岩—蒸发岩共生体系仅发育于水体相对局限的沉积环境,主要包括两种类型:(1)碳酸盐台地边缘局限—蒸发台地的潮坪—潮上带;(2)碳酸盐岩台地

屏障后的潮坪和潟湖(徐安娜等,2016;文华国等,2021;Wang *et al.*,2022)。“潮坪萨布哈模式”和“水下浓缩沉积模式”是浅层碳酸盐岩—蒸发岩共生体系发育的两种重要模式(文华国等,2021)。

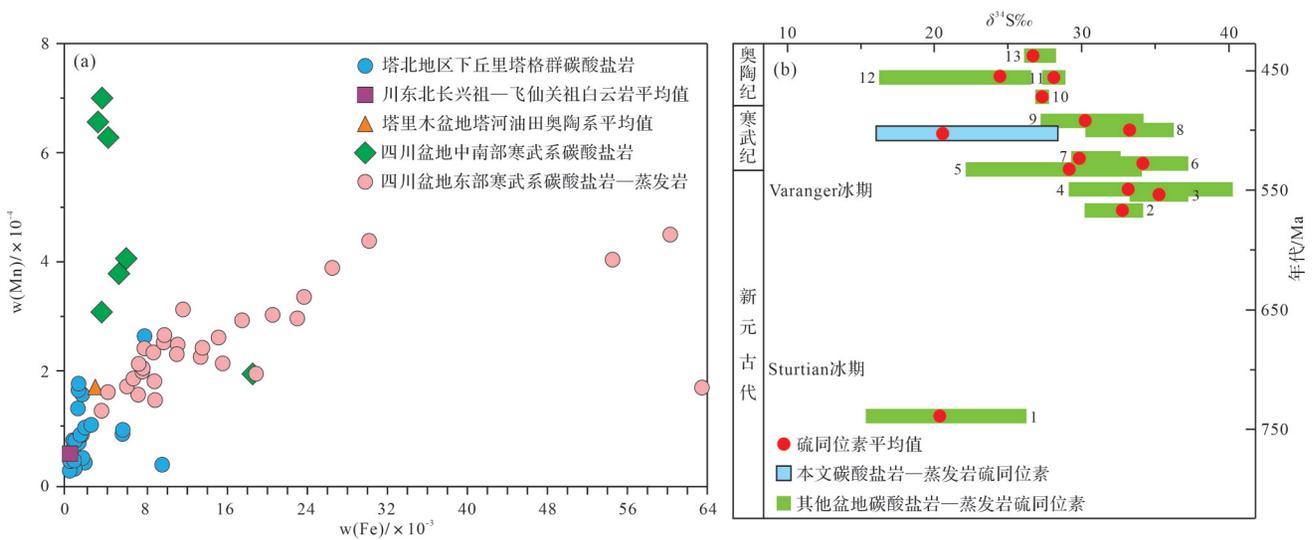


图 10 四川盆地东部与其他盆地 Fe、Mn 含量及 S 同位素组成 ($\delta^{34}\text{S}$) 特征

(a) Fe 和 Mn 微量元素数据图 (黄思静, 2009; 马永生, 2015; 李斌等, 2019); (b) S 同位素在新元古代晚期和古生代早期的演化 (据 Meng *et al.*, 2019 修改); 1. 加拿大红石河; 2. 巴西 Irecê 盆地; 3. 西伯利亚, 未命名的前寒武纪; 4. 印度汉瑟兰组; 5. 伊朗霍尔木兹组; 6. 西伯利亚 (下寒武统); 7. 伊朗德苏系列; 8. 西伯利亚 (上一寒武统); 9. 西伯利亚 (中寒武统下); 10. 中国塔里木盆地; 11. 中国鄂尔多斯盆地; 12. 加拿大西北地区; 13. 加拿大威利斯顿盆地

Fig.10 Characteristics of Fe and Mn contents and S isotopic composition ($\delta^{34}\text{S}$) in the eastern Sichuan Basin and other basins

Fe and Mn trace element data plots (Huang, 2009; Ma, 2015; Li *et al.*, 2019); (b) S isotope evolution in the Late Neoproterozoic and Early Paleozoic (modified from Meng *et al.*, 2019); 1. Red Rock River, Canada; 2. Irecê Basin, Brazil; 3. Siberia, unnamed Precambrian; 4. Hanselan Formation, India; 5. Hormuz Formation, Iran; 6. Siberia (lower Cambrian); 7. Desu Series, Iran; 8. Siberia (upper-lower Cambrian); 9. Siberia (lower middle Cambrian); 10. Tarim Basin, China; 11. Ordos Basin, China; 12. northwest Territories, Canada; 13. Williston Basin, Canada

四川盆地东部地区高台组沉积时期表现为开放的氧化环境, 沉积环境为碳酸盐岩局限台地, 以潮坪、潟湖等沉积亚相为主, 海水的盐度较高, 气候条件表现为炎热干旱, 同时受到大气降水的影响。在海平面相对较低的时期, 气温高, 沉积物中的孔隙水持续蒸发, 在此阶段形成蒸发岩, 部分蒸发岩在沉积过程中受到大气降水的影响开始溶解; 在海平面相对较高的时期, 随着海水的补给, 沉积物孔隙水中的盐度降低, 有利于碳酸盐岩的沉积, 海平面周期性的上升和下降形成了碳酸盐岩—蒸发岩共生体系。在此背景下, 共生体系的发育可分为两个阶段: (1) 海平面下降时期蒸发岩—白云岩沉积阶段; (2) 海平面上升时期白云岩—蒸发岩—灰岩沉积阶段。不同的沉积阶段导致蒸发岩的形态特征不同, 可分为厚层状、层状、团块状和胶结物 (图 11)。

5.1.1 海平面下降时期蒸发岩—白云岩沉积阶段

蒸发岩的特征表现为厚层状、层状、团块状形态。厚层状蒸发岩具块状结构特征, 层厚一般大于 5 cm, 主要表现为纯石膏岩或盐岩, 不含或少含过渡类型的碳酸盐岩, 反映了水动力较差的氧化还原环境; 层状蒸发岩具水平层理特征, 层厚为 0.01~5 cm, 主要表现为相对厚的蒸发岩夹纹层状碳酸盐岩; 团

块状蒸发岩具斑块状特征, 团块直径多小于 0.01 cm, 围岩一般为泥晶级碳酸盐岩, 团块状蒸发岩的分选差, 磨圆多为棱角状 (图 10)。

研究区沉积环境为局限碳酸盐台地, 在海平面相对较低的时期, 气温高, 潟湖中的水体持续蒸发, 导致潟湖的盐度增加, 待其浓度达到石膏或盐岩的结晶程度时, 蒸发岩出现沉淀。长期干旱炎热的气候条件和局限的潟湖环境有利于厚层状蒸发岩的发育, 岩石组合序列上表现为碳酸盐岩—石膏—盐岩的特征, 发育模式多表现为“水下浓缩沉积模式” (图 11a)。

在潮坪—潮上带, 沉积物中的孔隙水在干旱炎热的气候条件下持续蒸发, 在此阶段强烈的蒸发作用导致海水浓度的提高, 蒸发岩开始出现沉淀, 同时提高了潮上带沉积物粒间水的 Mg/Ca 值 (Xue *et al.*, 2020), 高的 Mg/Ca 值导致下覆文石或方解石发生白云石化。长时间的白云石化作用消耗了沉积物粒间水的 Mg/Ca 值, Ca²⁺ 浓度提高, 富含 Ca²⁺ 的孔隙流体又会为蒸发岩的形成提供重要的物质基础 (Evans and Nunn, 1989)。部分蒸发岩在沉积过程中受到大气降水的影响出现溶解和断裂的现象。岩石组合序列上表现为蒸发岩—碳酸盐岩—蒸发岩—碳酸盐岩互层式的特征, 发育模式多表现为“潮坪萨布哈模式” (图 11b)。

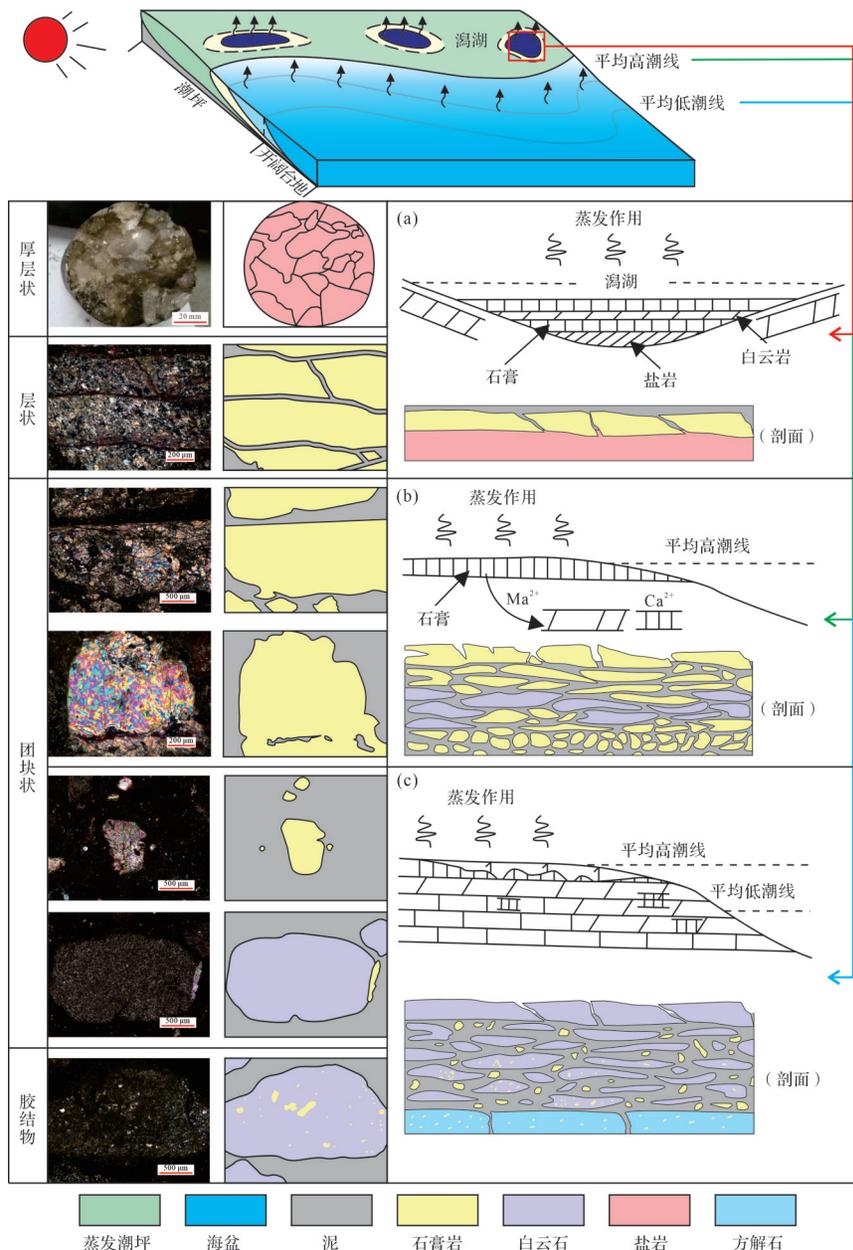


图 11 四川盆地东部高台组碳酸盐岩—蒸发岩共生体系沉积过程

Fig.11 Sedimentation process of carbonatite-evaporite syngenetic system, Gaotai Formation, eastern Sichuan Basin

5.1.2 海平面上升时期白云岩—蒸发岩—灰岩沉积阶段

蒸发岩的特征表现为团块状和胶结物形态。团块状蒸发岩具斑点状特征,围岩一般为泥晶级碳酸盐岩,分选较差磨圆多为次棱角状;蒸发岩胶结物具散点状特征,无固定形状,围岩为泥晶级碳酸盐岩或颗粒碳酸盐岩(图11)。

研究区总体表现为炎热干旱的沉积环境,海平面的相对上升有利于碳酸盐岩的发育,海水和大气降水的双重补给使潟湖水体和孔隙水的盐度下降,

不利于蒸发岩的发育甚至使前期形成的蒸发岩出现断裂和溶解,导致蒸发岩以团块状和胶结物的形式赋存在碳酸盐岩中。岩石组合序列上表现为碳酸盐岩—蒸发岩—碳酸盐岩夹层式的特征,发育模式多表现为“潮坪萨布哈模式”(图11c)。

伴随着周期性的海水快速流入和退出,在局限萨布哈盐水的潟湖或潮坪等氧化还原环境中,炎热干旱气候,导致在海平面下降时期发生准同生蒸发岩的沉积和准同生碳酸盐岩的白云石化作用;在海平面上升时期,受到大气降水的影响发生同生蒸发

岩的断裂溶解和准同生碳酸盐岩的沉积,导致了碳酸盐岩—蒸发岩共生体系在研究区的广泛发育。

5.2 共生体系沉积机理

在地球化学分析揭示的古气候、古海洋环境信息的基础上,结合共生体系岩石组合序列岩石学特征、层序格架内分布和体系域内的平面展布特征,对共生体系成因模式进行研究,并对共生体系沉积机理进行了分析(图12)。

四川盆地东部地区高台组时期,属于海退背景。在沉积早期,海平面上升,颗粒滩体退积,碳酸盐局限台地处于海平面以下,研究区低部位发育进积或加积的灰岩,西部高部位蒸发强烈,由于毛细管浓缩作用或回流渗透作用存在少量含膏白云岩的沉积,该时期共生体系极少发育(图12a)。在高位域中期,海平面下降,颗粒滩体进积,研究区低部位发育灰岩,滩间发育潟湖沉积蒸发岩,与下覆碳酸盐岩形成蒸发岩上覆碳酸盐岩的组合序列;滩后与潟湖之间形成的微高地由于属于暴露强蒸发环境沉积蒸发岩,后由于Ca/Mg比例失衡,富Mg²⁺流体在毛细管浓

缩作用下形成白云岩,形成碳酸盐岩与蒸发岩互层的组合序列;潟湖在强蒸发环境下沉积巨厚石膏岩,潟湖湖面逐渐降低与石膏岩大致平齐,在毛细管浓缩作用下形成薄层白云岩,湖底灰岩、石膏岩与薄层白云岩形成碳酸盐岩夹蒸发岩的组合序列;潟湖后高地在强蒸发环境下沉积石膏岩,与下伏白云岩形成碳酸盐岩上覆蒸发岩的组合序列(图11b)。在沉积中期,海平面略上升,颗粒滩体加积,研究区低部位发育灰岩,加积的滩体与下伏石膏岩组成了碳酸盐岩上覆蒸发岩的组合序列;海平面的略上升为滩后与潟湖间的白云岩沉积提供了充足的空间和物源,在毛细管浓缩作用下发育白云岩,导致白云岩增厚与上期形成的岩石组合序列组合形成了碳酸盐岩夹蒸发岩组合序列;海平面的略上升同样也为潟湖的石膏岩沉积提供了充足的空间和物源,形成的石膏岩与上期形成的岩石组合序列组合形成了蒸发岩夹碳酸盐岩组合序列;潟湖后高地没有得到海水空间和物源的补给,可能由于在暴露环境中,受大气降水影响出现石膏岩的溶解(图12c)。在沉积晚期,海

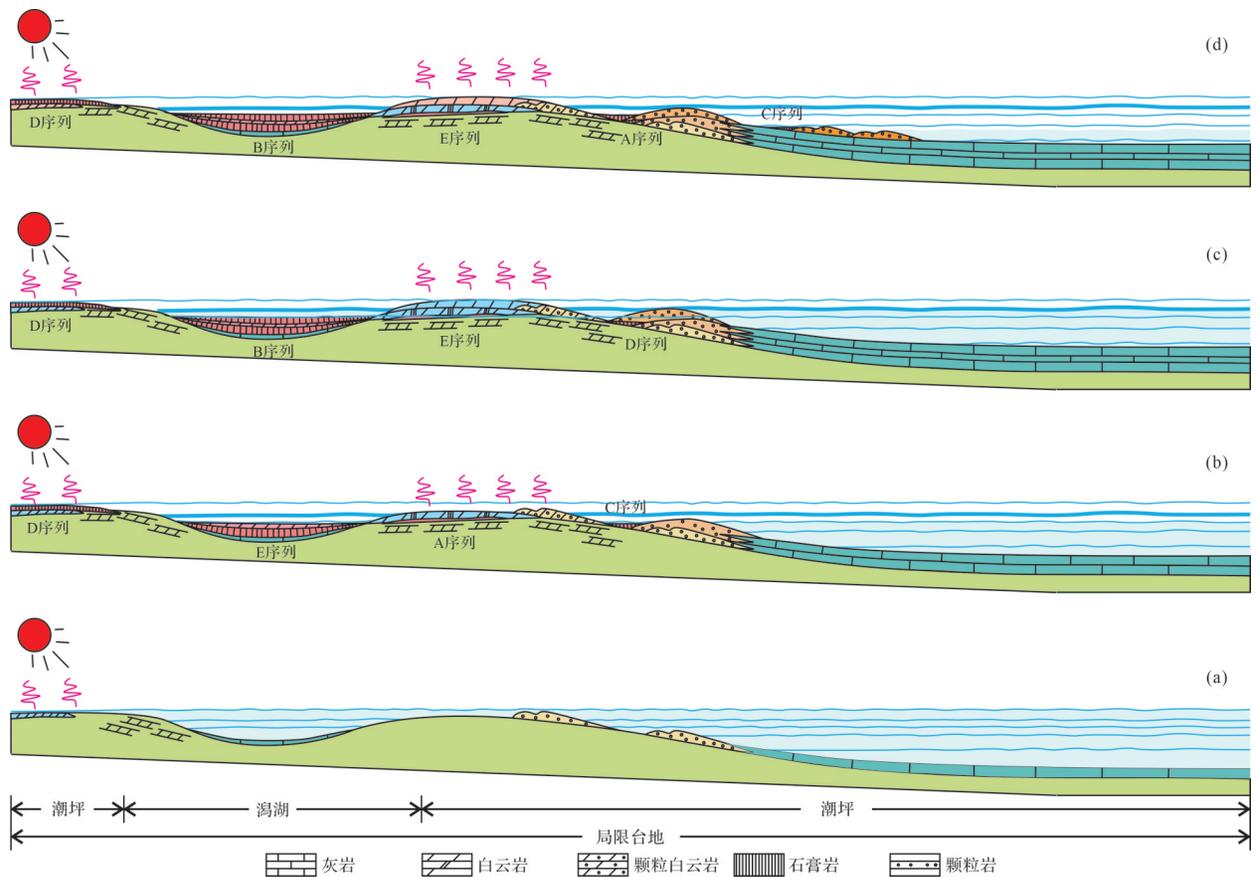


图12 四川盆地东部高台组碳酸盐岩—蒸发岩共生体系沉积机理

Fig.12 Sedimentation mechanism of carbonatite-evaporite syngenetic system, Gaotai Formation, eastern Sichuan Basin

平面大幅下降,颗粒滩体进积,研究区低部位发育灰岩,滩后潟湖形成的石膏岩与下伏灰岩组合形成蒸发岩上覆碳酸盐岩的岩石组合序列;滩间潟湖沉积的石膏岩与上期的岩石组合序列形成了碳酸盐岩与蒸发岩互层组合序列;滩后与潟湖间的白云岩由于毛细管浓缩作用出现沉积与上期形成的岩石组合序列组合形成了碳酸盐岩夹蒸发岩组合序列;潟湖与湖后高地由于处在暴露环境中,未受到海水补给和保护,可能受大气降水影响出现石膏岩的溶解(图12d)。总之,碳酸盐岩—蒸发岩共生体系岩石组合序列的发育是海平面周期升降运动、滩体障壁作用、干旱炎热的气候和较大海水盐度综合作用的结果。

5.3 共生体系演化模式

通过对研究区碳酸盐岩与蒸发岩的组合形式和蒸发岩的赋存状态,基于沉积过程与沉积模式及岩相古地理,对共生体系的演化模式进行探讨。

前人认为海相碳酸盐岩—蒸发岩共生体系主要发育在萨布哈、潟湖或潮坪等暴露蒸发环境(Pan and Erwin, 2002; Yang *et al.*, 2017; Hauck *et al.*, 2018),部分发育在碳酸盐斜坡(张琼, 2021)。四川盆地东部地区高台组沉积环境主要表现为碳酸盐岩和陆源碎屑岩混合沉积的局限台地相沉积。高台组早期,研究区经历一次相对较长时间的海退,研究区西部主要发育混积潮坪亚相,东部发育潮坪亚相;高台组中期,研究区经历一次短暂的海退,西部发育的混积潮坪亚相范围减小,研究区主要发育潮坪亚相,持续的蒸发环境导致大规模的膏质潮坪沉积,也促进了膏质潟湖的发育;高台组晚期由于兴凯运动的加剧、持续性的海退和古隆起的影响,研究区西部部分地层受到剥蚀(胡忠贵等, 2023; 王纪煊等, 2024)。

海相碳酸盐岩的成分和矿物学证据显示,寒武纪时期海水与现代海水成分截然不同,属于富 Ca^{2+} 低 SO_4^{2-} 的“方解石海”(Meng *et al.*, 2018),高Ca和高盐度的海水是碳酸盐岩—蒸发岩共生体系发育的主要物质来源。海平面上升时相对开放的沉积环境和海平面下降时半封闭的沉积环境快速交替,为共生体系的沉积提供了物质保障和环境条件。寒武系干旱炎热的古气候更是催化了共生体系的发育。

碳酸盐岩—蒸发岩共生体系的岩石组合序列揭示了不同海平面条件与沉积过程。海平面下降时期蒸发岩—白云岩沉积阶段存在两个沉积模式,在潟湖表现为“水下浓缩沉积模式”,在潮坪表现为“萨布

哈模式”;海平面上升时期白云岩—蒸发岩—灰岩沉积阶段主要表现为“潮坪萨布哈模式”(图13)。

海平面下降时期气候干旱,大气降水减少,海水补给较少,蒸发作用剧烈,局限台地中潟湖和潮坪中的水分快速蒸发,蒸发岩矿物析出,在潟湖中形成厚层状蒸发岩、潮坪中形成层状蒸发岩,蒸发岩的形成导致流体富 Mg^{2+} 促进了碳酸盐岩的发育。随着靠近海岸线,强蒸发沉积环境逐渐减弱,不利于蒸发岩的发育。从局限台地潮坪的潟湖—蒸发潮坪环境到开阔台地环境,蒸发岩呈现不同的赋存状态,依次为厚层状、层状、团块状和胶结物形态,主要发育蒸发岩上覆碳酸盐岩、碳酸盐岩与蒸发岩互层、蒸发岩夹碳酸盐岩和碳酸盐岩上覆蒸发岩的岩石组合序列。

海平面上升时期气候相对湿润,存在大气降水补给,主要是海水补给,大气降水和海水补给对该时期蒸发岩的发育起到了一定的破坏作用。此时期水分的补给和蒸发的相对减弱,导致沉积水体的蒸发岩矿物含量相对较低,厚层状、层状和团块状蒸发岩发育较少,膏质通常以团块状中的斑点状或散点状胶结物的形式存在。该时期主要表现为含膏质胶结物的碳酸盐岩沉积,与海平面下降时期发育的碳酸盐岩—蒸发岩共生体系多组合为碳酸盐岩夹蒸发岩和蒸发岩上覆碳酸盐岩的岩石组合序列。

富 Ca^{2+} 低 SO_4^{2-} 的“方解石海”和干旱气候条件下碳酸盐岩—蒸发岩共生体系沉积模式以海平面的波动上升下降循环往复为特征,形成了各种不同样式的蒸发岩赋存状态和共生体系岩石组合序列,代表了研究区干旱与湿润气候条件的循环变化,体现海平面控制下共生体系沉积模式的演化,为海相蒸发环境碳酸盐岩—蒸发岩共生体系沉积模式提供了新的思路与认识。

6 结论

(1) 四川盆地东部地区高台组碳酸盐岩—蒸发岩共生体系五类岩石组合序列包括:碳酸盐岩与蒸发岩互层(A),蒸发岩夹碳酸盐岩(B),蒸发岩上覆碳酸盐岩(C),碳酸盐岩上覆蒸发岩(D),碳酸盐岩夹蒸发岩(E)。共生体系主要发育在研究区中部和南部,岩石组合序列连续性较好,在垂向上和平面上的变化快。

(2) 研究区绝大多数Z值大于120,且 $\delta^{13}\text{C}$ 值大于-2‰;古海水温度介于23.10℃~40.64℃,平均温度为30.54℃,较高的Fe值(平均值 $1\ 766.65\times 10^{-5}$)、

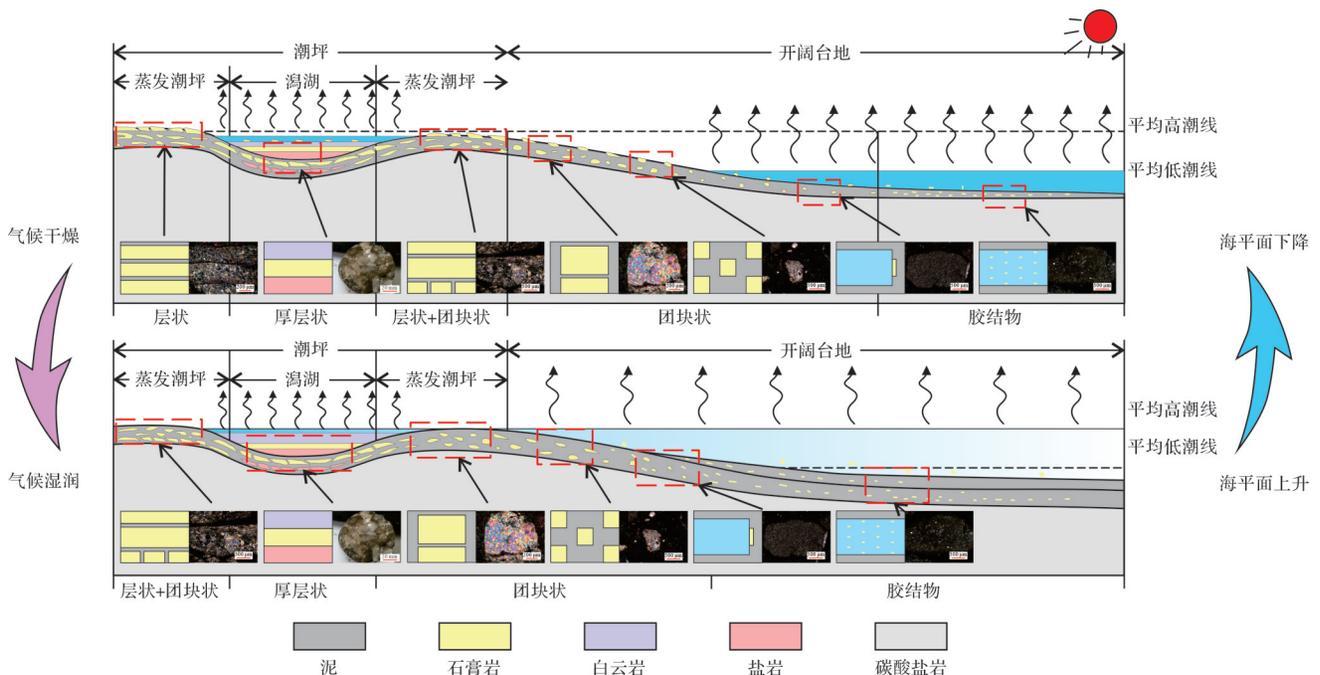


图 13 四川盆地东部高台组碳酸盐岩—蒸发岩共生体系沉积演化模式

Fig.13 Sedimentary evolutionary pattern of carbonatite-evaporite syngenetic system, Gaotai Formation, eastern Sichuan Basin

Mn值(平均值为 25.26×10^{-5})和较低的S同位素值(平均值为 19.3‰),表明高台组沉积环境为温暖或炎热的古气候和咸化海水环境,水体氧化程度较高,经历了与大气水有关的相对开放体系中的成岩作用。

(3) 富 Ca^{2+} 低 SO_4^{2-} 的“方解石海”、干旱炎热的气候条件、半开放半封闭的沉积环境和海平面的上升下降循环形成了不同的蒸发岩赋存状态和共生体系岩石组合序列,共生体系的发育可分为两个阶段:海平面下降时期蒸发岩—白云岩沉积阶段、海平面上升时期白云岩—蒸发岩—灰岩沉积阶段。存在两个沉积模式,在潟湖表现为“水下浓缩沉积模式”,在潮坪表现为“萨布哈模式”。

参考文献(References)

陈荣坤. 1994. 稳定氧碳同位素在碳酸盐岩成岩环境研究中的应用[J]. 沉积学报, 12(4): 11-21. [Chen Rongkun. 1994. Application of stable oxygen and carbon isotope in the research of carbonate diagenetic environment[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 12(4): 11-21.]

杜洋, 樊太亮, 高志前. 2016. 塔里木盆地中下奥陶统碳酸盐岩地球化学特征及其对成岩环境的指示: 以巴楚大板塔格剖面和阿克苏蓬莱坝剖面为例[J]. 天然气地球科学, 27(8): 1509-1523. [Du Yang, Fan Tai liang, Gao Zhiqian. 2016. Geochemical characteristics and their implications to diagenetic environment of Lower-Middle Ordovician carbonate rocks, Tarim Basin, China: A case study of Bachu Dabantage outcrop and Aksu Penglaiba outcrop[J].

Natural Gas Geoscience, 27(8): 1509-1523.]

胡安平, 沈安江, 杨翰轩, 等. 2019. 碳酸盐岩—膏盐岩共生体系白云岩成因及储盖组合[J]. 石油勘探与开发, 46(5): 916-928. [Hu Anping, Shen Anjiang, Yang Hanxuan, et al. 2019. Dolomite genesis and reservoir-cap rock assemblage in carbonate-evaporite paragenesis system[J]. Petroleum Exploration and Development, 46(5): 916-928.]

胡召齐, 朱光, 刘国生, 等. 2009. 川东“侏罗山式”褶皱带形成时代: 不整合面的证据[J]. 地质评论, 55(1): 32-42. [Hu Zhaoqi, Zhu Guang, Liu Guosheng, et al. 2009. The folding time of the eastern Sichuan Jura-type fold belt: Evidence from unconformity[J]. Geological Review, 55(1): 32-42.]

胡忠贵, 王纪焯, 李世临, 等. 2023. 川东地区寒武系高台组白云岩—蒸发岩共生地层高频层序划分及地质意义[J]. 岩性油气藏, 35(2): 113-124. [Hu Zhonggui, Wang Jixuan, Li Shilin, et al. 2023. High-frequency sequence division and geological significance of dolomite-evaporite paragenetic strata of Cambrian Gaotai Formation in eastern Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 35(2): 113-124.]

胡忠贵, 吴松, 郭艳波, 等. 2020. 川东地区下寒武统龙王庙组储层特征及主控因素研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 17(5): 1-9. [Hu Zhonggui, Wu Song, Guo Yanbo, et al. 2020. The study on reservoir characteristics and main controlling factors of lower Cambrian Longwangmiao Formation in eastern Sichuan Basin[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 17(5): 1-9.]

黄涵宇. 2018. 川东南地区古隆起形成演化及其控油气作用[D]. 北京: 中国地质大学(北京). [Huang Hanyu. 2018. Formation and evolution of paleo-uplift in southeastern Sichuan Basin and its con-

- trol on hydrocarbon accumulation[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).]
- 黄思静. 2009. 塔里木盆地塔河油田寒武系深埋岩溶的物质基础与埋藏成岩作用[D]. 成都:成都理工大学. [Huang Sijing. 2009. Material basis and buried diagenesis of Cambrian-Ordovician deeply buried karst in the Tarim Basin Tahe oilfield [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology.]
- 李斌,彭军,夏青松,等. 2019. 塔北地区寒武系下丘里塔格群白云石化模式[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 49(2): 310-322. [Li Bin, Peng Jun, Xia Qingsong, et al. 2019. Dolomitization model of Lower Qiulitage Group in Tabei area[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 49(2): 310-322.]
- 李佳,胡忠贵,江梦宇,等. 2023. 微波消解—电感耦合等离子体原子发射光谱法同时测定碳酸盐岩中Ca、Mg、Sr、Ba等13种元素[J]. 中国无机分析化学, 13(1): 94-99. [Li Jia, Hu Zhonggui, Jiang Mengyu, et al. 2023. Simultaneous determination of 13 elements such as Ca, Mg, Sr, Ba in carbonate rocks by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry with microwave digestion[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 13(1): 94-99.]
- 李凌,谭秀成,邹春,等. 2012. 四川盆地雷口坡组膏盐岩成因及膏盐盆迁移演化与构造意义[J]. 地质学报, 86(2): 316-324. [Li Ling, Tan Xiucheng, Zou Chun, et al. 2012. Origin of the Leikoupo Formation gypsum-salt and migration evolution of the gypsum-salt pot in the Sichuan Basin, and their structural significance[J]. Acta Geologica Sinica, 86(2): 316-324.]
- 李庆宽,樊启顺,山发寿,等. 2018. 海陆相蒸发岩硫同位素值变化和地球化学应用[J]. 盐湖研究, 26(1): 73-80. [Li Qingkuan, Fan Qishun, Shan Fashou, et al. 2018. The variation of sulfur isotope in marine-continental evaporites and its geochemical applications [J]. Journal of Salt Lake Research, 26(1): 73-80.]
- 李勇,钟建华,温志峰,等. 2006. 蒸发岩与油气生成、保存的关系[J]. 沉积学报, 24(4): 596-606. [Li Yong, Zhong Jianhua, Wen Zhifeng, et al. 2006. Study on the relationship between evaporate and hydrocarbon generation[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 24(4): 596-606.]
- 刘朝全,姜学峰. 2017. 2016年国内外油气行业发展报告[M]. 北京:石油工业出版社. [Liu Chaoquan, Jiang Xuefeng. 2017. The development report on oil and gas industry in domestic and overseas in 2016[M]. Beijing: Petroleum Industry Press.]
- 刘丽红,杜小弟,徐守礼,等. 2017. 四川盆地中南部寒武系白云岩特征及形成机制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 47(3): 775-784. [Liu Lihong, Du Xiaodi, Xu Shouli, et al. 2017. Characteristics and formation of the Cambrian dolomite in middle-south Sichuan Basin, China[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 47(3): 775-784.]
- 罗贝维,魏国齐,杨威,等. 2013. 四川盆地晚震旦世古海洋环境恢复及地质意义[J]. 中国地质, 40(4): 1099-1111. [Luo Beiwei, Wei Guoqi, Yang Wei, et al. 2013. Reconstruction of the Late Sinian paleo-ocean environment in Sichuan Basin and its geological significance[J]. Geology in China, 40(4): 1099-1111.]
- 罗顺社,汪凯明. 2010. 河北宽城地区中元古代高于庄组碳酸盐岩碳氧同位素特征[J]. 地质学报, 84(4): 492-499. [Luo Shunshu, Wang Kaiming. 2010. Carbon and oxygen isotope composition of carbonatic rock from the Mesoproterozoic Gaoyuzhuang Formation in the Kuancheng area, Hebei province[J]. Acta Geologica Sinica, 84(4): 492-499.]
- 马永生. 2015. 川东北长兴组—飞仙关组天然气勘探成果与展望[R]. 北京:中国石油化工集团公司. [Ma Yongsheng. 2015. Achievements and prospects of natural gas exploration in Changxing Formation-Fixianguan Formation, northeast Sichuan[R]. Beijing: China Petroleum and Chemical Corporation.]
- 曲长胜,邱隆伟,杨勇强,等. 2017. 吉木萨尔凹陷芦草沟组碳酸盐岩碳氧同位素特征及其古湖泊学意义[J]. 地质学报, 91(3): 605-616. [Qu Changsheng, Qiu Longwei, Yang Yongqiang, et al. 2017. Carbon and oxygen isotope compositions of carbonatic rock from Permian Lucaogou Formation in the Jimsar Sag, NW China and their paleolimnological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 91(3): 605-616.]
- 王纪煊. 2023. 川东及周缘地区寒武系白云岩—蒸发岩共生体系沉积—成岩系统研究[D]. 荆州:长江大学. [Wang Jixuan. 2023. Study on the sedimentation-formation system of Cambrian dolomite-evaporite paragenesis system in the eastern Sichuan Basin and its peripheral area[D]. Jingzhou: Yangtze University.]
- 王纪煊,胡忠贵,李世临,等. 2024. 四川盆地东部地区中寒武统高台组沉积相及有利区预测[J]. 沉积学报, 42(5): 1670-1684. [Wang Jixuan, Hu Zhonggui, Li Shilin, et al. 2024. Sedimentary facies and favorable areas prediction of the middle Cambrian Gaotai Formation in the eastern Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 42(5): 1670-1684.]
- 王文楷,许国明,宋晓波,等. 2017. 四川盆地雷口坡组膏盐岩成因及其油气地质意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 44(6): 697-707. [Wang Wenkai, Xu Guoming, Song Xiaobo, et al. 2017. Genesis of gypsum-salt in the Leikoupo Formation and its hydrocarbon significance in the Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 44(6): 697-707.]
- 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 Huaguo, Huo Fei, Guo Pei, et al. 2021. Advances and prospects of dolostone-evaporite paragenesis system[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 39(6): 1321-1343.]
- 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 Anna, Hu Suyun, Wang Zecheng, 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.]
- 徐文世,于兴河,刘妮娜,等. 2005. 蒸发岩与沉积盆地的含油气性[J]. 新疆石油地质, 26(6): 715-718. [Xu Wenshi, Yu Xinghe, Liu Nina, et al. 2005. Petroliferous property in evaporitic rocks and sedimen-

- tary basins[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 26(6): 715-718.]
- 张琼. 2021. 川东地区下三叠统嘉陵江组二段白云岩与蒸发岩共生体系成岩作用及成岩流体[D]. 成都: 成都理工大学. [Zhang Qiong. 2021. Diagenesis and diagenetic fluid under the symbiosis system of dolomite and evaporite in the 2nd member of Lower Triassic Jialingjiang Formation, eastern Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology.]
- 赵海彤, 张永生, 邢恩袁, 等. 2018. 陕北盐盆中奥陶统马五段蒸发岩硫同位素特征及其古环境意义[J]. *地质学报*, 92(8): 1680-1692. [Zhao Haitong, Zhang Yongsheng, Xing Enyuan, et al. 2018. Sulfur isotopic characteristics of evaporite in the Middle Ordovician Mawu member in the salt basin of northern Shaanxi and its paleoenvironment significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(8): 1680-1692.]
- 郑希民, 杨柳, 易定红, 等. 2019. 柴达木盆地西部古近系石膏及其硫同位素分布特征[J]. *沉积与特提斯地质*, 39(4): 65-70. [Zheng Ximin, Yang Liu, Yi Dinghong, et al. 2019. Distribution of gypsum and sulfur isotopes in the Palaeogene strata, western Qaidam Basin, Qinghai[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 39(4): 65-70.]
- 钟逸斯, 王立成, 董浩伟. 2022. 蒸发岩沉积特征及环境综述[J]. *沉积学报*, 40(5): 1188-1214. [Zhong Yisi, Wang Licheng, Dong Haowei. 2022. Evaporite sedimentary characteristics and environment: A review[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(5): 1188-1214.]
- Abrantes Jr F R, Nogueira A C R, Soares J L. 2016. Permian paleogeography of west-central Pangea: Reconstruction using sabkha-type gypsum-bearing deposits of Parnaíba Basin, northern Brazil[J]. *Sedimentary Geology*, 341: 175-188.
- Clayton R N, Degens E T. 1959. Use of carbon isotope analyses of carbonates for differentiating fresh-water and marine sediments: GEOLOGICAL NOTES[J]. *AAPG Bulletin*, 43(4): 890-897.
- Clayton R N, Epstein S. 1958. The relationship between O^{18}/O^{16} ratios in coexisting quartz, carbonate, and iron oxides from various geological deposits[J]. *The Journal of Geology*, 66(4): 345-371.
- Evans D G, Nunn J A. 1989. Free thermohaline convection in sediments surrounding a salt column[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B9): 12413-12422.
- Hauck T E, Corlett H J, Grobe M, et al. 2018. Meteoric diagenesis and dedolomite fabrics in precursor primary dolomicrite in a mixed carbonate–evaporite system[J]. *Sedimentology*, 65(6): 1827-1858.
- Horacek M, Brandner R, Abart R. 2007. Carbon isotope record of the P/T boundary and the Lower Triassic in the southern Alps: Evidence for rapid changes in storage of organic carbon[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 252(1/2): 347-354.
- Kaufman A J, Knoll A H. 1995. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: Stratigraphic and biogeochemical implications[J]. *Precambrian Research*, 73(1/2/3/4): 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.
- Li D, Ling H F, Jiang S Y, et al. 2009. New carbon isotope stratigraphy of the Ediacaran-Cambrian boundary interval from SW China: Implications for global correlation[J]. *Geological Magazine*, 146(4): 465-484.
- Kendall C G St C, Weber L J, Alsharhan A S. 2009. The giant oil field evaporite association: A function of the Wilson cycle, climate, Basin position and sea level[R]. Denver: AAPG.
- López-Quiros A, Barbier M, Martín J M, et al. 2016. Diagenetic evolution of Tortonian temperate carbonates close to evaporites in the Granada Basin (SE Spain)[J]. *Sedimentary Geology*, 335: 180-196.
- Meng F W, Zhang Y S, Galamy A R, et al. 2018. Ordovician seawater composition: Evidence from fluid inclusions in halite[J]. *Geological Quarterly*, 62(2): 344-352.
- Meng F W, Zhang Z L, Schiffbauer J D, et al. 2019. The Yudomski event and subsequent decline: New evidence from $\delta^{34}S$ data of lower and middle Cambrian evaporites in the Tarim Basin, western China[J]. *Carbonates and Evaporites*, 34(3): 1117-1129.
- Moore C H, Wade W J. 2013. Carbonate reservoirs: Porosity and diagenesis in a sequence stratigraphic framework[M]. Amsterdam: Elsevier.
- Pan H Z, Erwin D H. 2002. Gastropods from the Permian of Guangxi and Yunnan provinces, South China[J]. *Journal of Paleontology*, 76(S56): 1-49.
- Wang J X, Hu Z G, Li S L, et al. 2022. Sedimentary characteristics and developmental models of the Cambrian dolostone-evaporite paragenesis system in the Sichuan Basin[J]. *Geofluids*, 2022(3/4): 5051804.
- Warren J K. 2006. *Evaporites: Sediments, resources and hydrocarbons* [M]. Berlin: Springer.
- Warren J K. 2010. Evaporites through time: Tectonic, climatic and Eustatic controls in marine and nonmarine deposits[J]. *Earth-Science Reviews*, 98(3/4): 217-268.
- Xue C, Wei M Y, Li X B, et al. 2020. The co-relationship of marine carbonates and evaporites: A study from the Tarim Basin, NW China [J]. *Carbonates and Evaporites*, 35(4): 122.
- Yan D P, Zhou M F, Song H L, et al. 2003. Origin and tectonic significance of a Mesozoic multi-layer over-thrust system within the Yangtze Block (South China)[J]. *Tectonophysics*, 361(3/4): 239-254.
- Yang X Q, Fan T L, Tang S, et al. 2017. Sedimentology and sequence stratigraphy of evaporites in the Middle Jurassic Buqu Formation of the Qiangtang Basin, Tibet, China[J]. *Carbonates and Evaporites*, 32(3): 379-390.
- Zhu M Y, Babcock L E, Peng S C. 2006. Advances in Cambrian stratigraphy and paleontology: Integrating correlation techniques, paleobiology, taphonomy and paleoenvironmental reconstruction[J]. *Palaeoworld*, 15(3/4): 217-222.

Sedimentary Characteristics and Evolutionary Patterns of Carbonatite-Evaporite Syngenetic System: A case study of the Gaotai Formation in eastern Sichuan Basin

WANG JiXuan¹, HU ZhongGui^{2,3}, YUAN GuangHui¹, LI ShiLin⁴, ZHANG Jun⁵, WANG WenJing², ZHANG ChenYu²

1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266000, China

2. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

3. Sedimentary Basin Research Center, Yangtze University, Wuhan 430100, China

4. Chongqing Gas Mine, PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Chongqing 402160, China

5. Hunan Drilling Branch of Southwest Petroleum Engineering Company Limited of SINOPEC, Changsha 410119, China

Abstract: [Objective] Carbonate-evaporite syngenetic systems are widely distributed in the Cambrian rocks of the Sichuan Basin. However, their development, depositional environments and processes and evolutionary modes have rarely been studied, and the research methods urgently need to be clarified. [Methods] The petrology and processes of the symbiotic system, the state of the evaporites, the depositional environment and the evolutionary pattern were investigated using drill core data, field sections, rock strata, C and O isotopes, Fe and Mn contents, and S isotopic composition. Neither the developmental characteristics of the symbiotic system and depositional environment nor its evolutionary pattern are well understood. [Results] (1) Five kinds of carbonate-evaporite symbiotic rock assemblages were found in the study area: interbedded carbonate rock and evaporite; evaporite sandwiched with carbonate rock; evaporite overlain by carbonate rock; carbonate rock overlain by evaporite rock; and carbonate rock sandwiched with evaporite rock. (2) The $\delta^{18}\text{O}$ values ranged predominantly from -9.00‰ to -8.00‰ , while $\delta^{13}\text{C}$ values ranged between -1.00‰ and 3.00‰ . Calculations of paleosalinity and paleotemperature using these isotope values gave the vast majority of $Z > 120$ and $\delta^{13}\text{C} > -2.00\text{‰}$, with paleoseawater temperatures in the range 23.10 °C - 40.64 °C . Fe was mainly concentrated in the range $(0-2\ 000) \times 10^{-5}$, and Mn from 10^{-5} to 30×10^{-5} . These indicate a warm or hot paleoclimate and saline seawater environment during deposition of the Gaotai Formation, with a high degree of oxidation in the water body, and the rock-forming activity occurring in a system relatively open to precipitation of atmospheric water. (3) Deposition of marine carbonate rocks and evaporites took place in a symbiotic system against a background of an arid, hot climate and a calcium-rich, low-sulfate, highly saline calcitic sea. This period of time witnessed two types of carbonatite-evaporite symbiotic development: A falling-sea-level evaporite-dolomite deposition stage (“tidal sabkha mode”), and a rising-sea-level dolomite-evaporite-greywacke deposition stage (“underwater condensed-deposition mode”). [Conclusions] The carbonatite-evaporite symbiotic system has recorded information about the paleoenvironment, paleoclimate and paleohaline water chemistry during the deposition period, as well as the depositional process and evolutionary pattern of the symbiotic system. This study provides new ideas and understandings of the depositional environments and patterns of the carbonatite-evaporite symbiotic system in the evaporitic environment of the marine phase of the developing Cambrian Gaotai Formation.

Key words: eastern Sichuan Basin; Cambrian Gaotai Formation; carbonatite-evaporite syngenetic system; sedimentary characteristics; sedimentary evolution

Foundation: National Science and Technology Major Project, No. 2016ZX05007002

Corresponding author: HU ZhongGui, E-mail: hzg1978@yangtzeu.edu.cn