文章编号:1000-0550(2024)00-0000-00

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.024

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

王纪煊1, 胡忠贵23, 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、Mn 和 S 同位素特征等资料,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)共生体系地球化 学特征 δ¹⁸O 主要集中在-8‰~-9‰;δ¹³C 主要集中在-1‰~3‰;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δ¹³C值大于-2‰,古海水温度在23.10 ℃~40.64 ℃; Fe主要集 中在 0~2 000×10-5; Mn 主要集中在 10-5~30×10-5, 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 低 SO4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

第一作者简介 王纪煊,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: hzg1978@yangtzeu.edu.cn 中图分类号 P512.2 文献标志码 A

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%^[1-2]。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 ^[3-6]。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^[7-9],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

收稿日期: 2023-08-03; 收修改稿日期: 2024-02-02

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05007002)[Foundation: National Science and Technology Major Project, No. 2016ZX05007002]

^[8]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^[10]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;王纪煊^[11]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系层位,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^[12-14]。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 统地分析研究。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^[13]。

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^[15]。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^[16];(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 发生在靠近次盆地中心的地方,这主要受气候变化和海平面波动的控制^[16]。在海侵时期的 供海水阶段,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^[17]。Francisco *et al.*^[18]研究了 Parnaiba 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.*^[19]描述了托尔托尼亚的格拉纳达盆(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^[20-21]。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,仍对其成因缺乏明确的认识。

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、硫、铁和锰等微量元素的地球 化学数据,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,发育一系列隔挡式褶皱带和隔 槽式褶皱带^[20](图 1a),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,除泥盆系地层缺失外,从第四系到震旦系均有发育。其中寒武系、二叠系、三叠系和侏罗系都属于研究区重要的油气储集层系。三叠系的雷口坡组^[7-8]、嘉陵江组^[11]和寒武系^[9]均存在碳酸盐岩—蒸发岩共生体系的沉积和发育,主要研究层位为寒武系高台组(图 1c)。



图 1 (a)研究区构造分区图; (b)研究区构造剖面图^[22-23]; (c)地层综合柱状图^[24] Fig. 1 (a) Tectonic zoning map of the study area; (b) tectonic section of the study area ^[22-23]; (c) stratigraphic

composite bar chart [24]

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^[21]。

2 样品和实验方法

针对高台组采集了碳酸盐样品共计 106 块,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比质谱仪 (型号: DELTAVAdvantage),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 (5 450~5 960 m) 进行碳氧同位素分析(表1),对32块样品(6491~6496m)测定Fe、Mn微量元素和S同位素组成(表2)。

深度/m	δ13C	$\delta^{18}\mathrm{O}$	Ζ	温度	深度/m	$\delta^{13}C$	δ^{18} O	Ζ	温度
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1 四川盆地东部高台组楼探1井δ¹³C和δ¹⁸O 同位素测试、古水体盐度及古温度计算结果 Table 1 Results of δ¹³C and δ¹⁸O isotope tests, paleohydrological salinity and paleotemperature calculations, well LT1, Gaotai Formation

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 µm 的尼龙筛之后,置于干燥器内干燥并冷却至常温。称取 0.1 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 ℃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 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^[25]。

表 2 四川盆地东部高台组 Fe、Mn、Sr 微量元素地球化学数据表 Table 2 Geochemical data for Fe, Mn and Sr trace elements in the Gaotai Formation, eastern Sichuan

Basin							
编号	Fe/10-5	Mn/10-5	δ ³⁴ S /%	编号	Fe/10-5	Mn/10-5	$\delta^{34}\mathrm{S}/\%_{00}$
2-1/43	1 124.093	25.357	16.776 566	2-17/43	436.270	16.879	20.655 918
2-2/43	1 182.945	31.808	17.480 550	2-18/43	992.218	26.930	18.918 543
2-3/43	904.034	15.565	16.893 492	2-19/43	735.945	21.860	13.584 255
2-4/43	731.961	16.535	15.443 906	2-20/43	2 669.850	39.222	19.691 407
2-5/43	366.390	13.708	15.873 967	2-21/43	3 033.102	43.986	18.959 328
2-6/43	624.553	18.070	19.696 540	2-22/43	775,697	21.407	21.348 855
2-7/43	1 579.766	22.116	19.049 054	2-23/43	770.080	20.986	20.951 257
2-8/43	1 773.303	29.815	20.349 921	2-24/43	2 322.215	30.133	21.530 054
2-9/43	882.043	24.066	18.109 840	2-25/43	896.814	18.918	21.253 732
2-10/43	1 371.283	24.821	19.197 626	2-26/43	5 459.620	40.537	20.591 790
2-11/43	1 118.430	23.891	14.694 931	2-27/43	6 042.423	45.151	25.257 192
2-12/43	1 356.666	23.228	15.215 678	2-28/43	2 390.191	33.913	22.938 433
2-13/43	1 532.205	26.749	17.198 719	2-29/43	801.378	24.699	21.608 238
2-14/43	686.851	19.391	20.333 580	2-31/43	1 908.151	20.196	20.640 838
2-15/43	2 077.471	30.826	20.726 938	2-37/43	—	_	_
2-16/43	990.885	26.026	20.981 684	2-43/43	6 352.086	17.845	20.381 444

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

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^[21]。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)、含石膏泥晶含白云灰岩(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及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)。



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 并, 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) 含石膏泥晶含白云灰岩, 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 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 m, 10×5 (+); (k) 石膏质白云岩, 猫 1 井, 4 740m, 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 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, 6 492.07 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 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 m, 10×5 (+); (k) gypsiferous dolomite, well M1, 4 740 m, 10×5 (+); (l) gypsum-bearing sandy dolomite, mainly composed of mud-crystalline dolomite sandy clasts, with oolites locally seen, well Z3, 5 708 m, 10×5 (+)



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, 5965 m; (c, d) 石膏岩, 楼探1井, 5595 m; (e, f) 石膏岩, 楼探1井, 6763 m; (g, h) 石 膏岩, 磨空严重, 楼探1井, 5670 m; (i, j) 含石膏泥晶白云岩, 仅剩一颗岩屑, 楼探1井, 5665 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, 5602 m; (m, n) 含白云石膏岩/石膏岩, 楼探1 井, 6558 m; (o, p) 含石膏泥晶白云岩, 楼探1井, 6435 m

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

(a, b) gypsum, well LT1, 5 965 m; (c, d) gypsum, well LT1, 5 595 m; (e, f) gypsum, well LT1, 6 763 m; (g, h) gypsum with severe grinding voids, well LT1, 5 670 m; (i, j) gypsum-bearing mud-crystalline dolomite, with single remaining rock chip, well LT1, 5 665 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 m; (m, n) gypsum-bearing dolomite/gypsum, well LT1, 6 558 m; (o, p) gypsum-bearing mud-crystalline dolomite, well LT1, 6 435 m

3.2 共生体系蒸发岩特征

研究区蒸发岩以石膏岩为主,及少量盐岩。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。镜下观察石膏团 块的分选较差,磨圆以次棱—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)。 表 3 碳酸盐岩---蒸发岩共生体系岩石特征划分表

	Table 3 (Characterization	n of the c	arbonate-evaj	porite syngenetic	c system	
赋存状态		石膏特征	Έ	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

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^[10],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: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。

表 4 碳酸盐岩—蒸发岩共生体系岩石特征划分表 Table 4 Characterization of the carbonate-evaporite syngenetic system

岩石组合序列	蒸发岩	碳酸盐岩		
A碳酸盐岩与蒸发岩互层	石膏岩、白云质石膏岩	泥—粉晶白云岩、石膏质白云岩		
B蒸发岩夹碳酸盐岩	石膏岩、盐岩、白云质石膏岩	石膏质白云岩、泥晶白云岩		
C 蒸发岩上覆碳酸盐岩	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		
D诺酚扑出上覆蒸出出	工高出 卢二氏工高出	泥晶白云岩、鲕粒白云岩、砂屑白云岩、		
D ్ W 取 並 石 上 復 然 仪 石	11首右、口厶與11首右	石膏质白云岩		
口花歌书出去茶作出	丁喜山 白、氏丁喜山	泥晶白云岩、石膏质白云岩、砂屑白云岩、		
L 恢酸益石 犬 孫 反石	 口 育 石 、 日 云 版 石 宥 石	砂质白云岩		

(1)碳酸盐岩与蒸发岩互层: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去岩。

(2) 蒸发岩夹碳酸盐岩: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。

(3)蒸发岩上覆碳酸盐岩: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。

(4)碳酸盐岩上覆蒸发岩: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。

(5)碳酸盐岩夹蒸发岩: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。



```
A.碳酸盐岩与蒸发岩互层; AB.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. earbonatite interbedded with evaporite

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)。

研究表明,在 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;在 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; 在 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;在 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;在 SSQ5 沉积时期,碳酸盐岩与蒸发岩互层、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;在 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。



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



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

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^[26]。结果表明,当δ¹⁸O<-5‰时,样品保留的原始数据部分受到破 坏;δ¹⁸O<-10‰时,样品保留的原始数据已基本不能使用^[27-29],所以使用数据时排除 δ¹⁸O<-10‰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^[30]: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(表1),表明δ¹⁸O 值介于-7.925‰~-11.417‰(共15 个样品低于-10‰),平均值为-9.473‰,主要介于-8‰~-9‰(图7a),表明样品的δ¹⁸O 数据 有效。δ¹³C 值分布在-3.977‰~3.909‰,平均值为1.452‰,主要介于-1‰~3‰(图7a)。同 时,碳氧同位素数据的相关性较差,相关系数为0.0249(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。



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δ¹³C、δ¹⁸O 值的增加^[31-32],结合前人对碳氧 同位素与盐度间的盐度指数 (*Z*) 计算公式^[28]:

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

(1)

即当 Z>120 时,为海相碳酸盐岩; Z<120 时,为陆相碳酸盐岩^[33-35]。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δ¹³C 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δ¹³C 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。



图 8 四川盆地东部高台组碳酸盐岩—蒸发岩*ð*¹³C-Z值关系图

Fig.8 δ^{3} C vs. Z in carbonatite-evaporites, Gaotai Formation, eastern Sichuan Basin 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^[35-36],温度对δ¹⁸Ο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^[37]:

 $T = 16.9 - 4.2(\delta^{18}O_{CaCO3 \ \forall E} + 0.22) + 0.13(\delta^{18}O_{CaCO3 \ \forall E} + 0.22)^2$ (2)

通过与第四纪海相碳酸盐岩的δ¹⁸O 平均值-1.2‰为标准进行年代校正(δ¹⁸O 平均值-(-1.2‰)=δ¹⁸O),用实测值与年代校正中δ¹⁸O 值相减,即可得到公式中的δ¹⁸O_{CaCO3 校正}。结 果表明高台组古海水温度介于 23.10 ℃~40.64 ℃,平均温度为 30.54 ℃;研究表明在高台 组沉积时期研究区为温暖或炎热的古气候。

4.2 Fe、Mn 微量元素和 S 同位素地球化学特征与地质意义

1) Fe、Mn 微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^[38]。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(表 2、图 9), 表明 Fe 值分布在 366.38×10⁻⁵~6 352.08×10⁻⁵,平均值为 1 766.65×10⁻⁵,主要介于 0~2 000×10⁻⁵; Mn 值分布在 13.70×10⁻⁵~45.15×10⁻⁵,平均值为 25.26×10⁻⁵,主要介于 10⁻⁵~30×10⁻⁵。



Fig.9 Geochemical characteristics of Fe, Mn and S trace elements in the well LT1, Gaotai Formation, eastern

Sichuan Basin

四川东北长兴组—飞仙关组碳酸盐岩中的 Fe、Mn 质量分数平均值为 55.64×10⁻⁵ 和 6.10×10⁻⁵[39];塔里木盆地塔河油田奥陶系 Fe、Mn 质量分数平均值为 322.7×10⁻⁵ 和 17.7×10⁻⁵[40]; 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 5×10⁻⁵ 和 9.122 1×10^{-5[41]};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[42]}(图 10a)。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、塔里木盆地塔河油田奥陶系高得多 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。而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)。





(a) Fe 和 Mn 微量元素数据图^[39-41]; (b) S 同位素在新元古代晚期和古生代早期的演化(修改自文献[38]); 1.加拿大红石河; 2. 巴西 Irece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(上一下寒武统); 9.西伯利亚(中寒武纪下); 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 Geochemical characteristics of Fe, Mn and S trace elements in the eastern Sichuan Basin and other basins Fe and Mn trace element data plots^[39-41]; (b) S isotope evolution in the Late Neoproterozoic and Early Paleozoic (modified from reference[38]); 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

2) S 同位素地球化学特征与地质意义

获得四川盆地东部高台组碳酸盐岩—蒸发岩共生样品的δ³⁴S值介于13.584‰~25.257‰, 平均值为19.270‰,主要介于16‰~21‰(表2、图9)。最大值和最小值相差11.673‰,说 明其物质来源或沉积环境波动较大^[43.45]。同期寒武系海水δ³⁴S的数值在30‰至45‰之间波 动^[38],研究区δ³⁴S值明显小于缺氧环境中海水的δ³⁴S值和其他同期盆地碳酸盐岩的δ³⁴S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、物缘为海水的特征,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*δ*³⁴S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

本文通过对研究区 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)碳酸盐台岩地边缘局限 ——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^[9,14,46]。"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^[46]。

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)。

(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5cm,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0.01~5cm,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0.01cm,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^[47],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^[48]。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)。



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

(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,团块直径小于 2×10⁻⁵ cm,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)。

所以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,由于受到炎热干旱气候的影响,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;由于受到大气降水的影响,在海平面上升时期发生同生蒸 发岩的断裂溶解和准同生碳酸盐岩的沉积的影响,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

通过对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。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,该时期共生体系很少 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,与下覆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,加积的滩体与下覆石 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覆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。



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

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 模式及研究区岩相古地理,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^[49-51],部分发育在碳酸盐斜坡^[52]。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,因为持续的蒸 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^[21]。

根据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 低 SO4的"方解石海"^[53],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 Mg²⁺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 要发育有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。



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

富 Ca 低 SO₄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,碳酸盐 岩夹蒸发岩,共五类。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)地球化学数值表明,绝大多数Z值大于120‰,且δ¹³C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1766.65×10⁻⁵)、Mn 值(平均值为25.26×10⁻⁵)和较低的S同位素值(平均值为19.270‰),研究表明在高台组 研究区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)高盐度富 Ca 低 SO4 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)

- [1] 刘朝全,姜学峰. 2016 年国内外油气行业发展报告[M]. 北京:石油工业出版社,2017. [Liu Chaoquan, Jiang Xuefeng. The development report on oil and gas industry in domestic and overseas in 2016[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2017.]
- [2] 中国石油勘探开发研究院. 全球油气勘探开发形势及油公司动态[M]. 北京:石油工业出版社,2017. [RIPED. Global petroleum E&D trends and company dynamics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2017.]
- [3] 钟逸斯,王立成,董浩伟. 蒸发岩沉积特征及环境综述[J]. 沉积学报, 2022, 40 (5): 1188-1214. [Zhong Yisi, Wang Licheng, Dong Haowei. Evaporite sedimentary characteristics and environment: A review[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(5): 1188-1214.]
- [4] 徐文世,于兴河,刘妮娜,等. 蒸发岩与沉积盆地的含油气性[J]. 新疆石油地质, 2005, 26 (6): 715-718. [Xu Wenshi, Yu Xinghe, Liu Nina, et al. Petroliferous property in evaporitic rocks and sedimentary basins[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26(6): 715-718.]
- [5] 李勇,钟建华,温志峰,等. 蒸发岩与油气生成、保存的关系[J]. 沉积学报, 2006, 24 (4): 596-606. [Li Yong, Zhong Jianhua, Wen Zhifeng, et al. Study on the relationship between evaporate and hydrocarbon generation[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(4): 596-606.]
- [6] St. C. Kendall C G, Weber L J, Alsharhan A S. The giant oil field evaporite association: A function of the Wilson cycle, climate,

Basin position and sea level[R]. Denver: AAPG, 2009.

- [7] 王文楷,许国明,宋晓波,等.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),
 2017,44(6): 697-707. [Wang Wenkai, Xu Guoming, Song Xiaobo, et al. 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), 2017, 44(6): 697-707.]
- [8] 李凌, 谭秀成, 邹春, 等. 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, 2012, 86(2): 316-324.
 [Li Ling, Tan Xiucheng, Zou Chun, et al. 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, 2012, 86(2): 316-324.]
- [9] Wang J X, Hu Z G, Li S L, et al. Sedimentary characteristics and developmental models of the Cambrian dolostone-evaporite paragenesis system in the Sichuan Basin[J]. Geofluids, 2022, 2022: 5051804.
- [10] 胡安平,沈安江,杨翰轩,等.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,2019,46(5):
 916-928. [Hu Anping, Shen Anjiang, Yang Hanxuan, et al. Dolomite genesis and reservoir-cap rock assemblage in carbonate-evaporite paragenesis system[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(5): 916-928.]
- [11] 王纪煊. 川东及周缘地区寒武系白云岩一蒸发岩共生体系沉积一成岩系统研究[D]. 荆州: 长江大学, 2023. [Wang Jixuan. 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, 2023.]
- [12] 王纪煊,胡忠贵,远光辉,等. 川东寒武系高台组碳酸盐岩—蒸发岩共生体系地球化学特征及沉积模式[J/OL]. 古地理学报,2024,26(4). http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4678.P.20240117.0832.002.html. [Wang Jixuan, Hu Zhonggui, Yuan Guanghui, et al. Geochemical characteristics and depositional model of carbonatite evaporite syngenetic system of the Cambrian Gaotai Formation in the eastern Sichuan Basin[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2024, 26(4). http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4678.P.20240117.0832.002.html.]
- [13] 胡忠贵,吴松,郭艳波,等. 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), 2020, 17 (5): 1-9. [Hu Zhonggui, Wu Song, Guo Yanbo, et al. 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), 2020, 17(5): 1-9.]
- [14] 徐安娜,胡素云,汪泽成,等.四川盆地寒武系碳酸盐岩一膏盐岩共生体系沉积模式及储层分布[J]. 天然气工业, 2016, 36(6): 11-20. [Xu Anna, Hu Suyun, Wang Zecheng, et al. Sedimentary mode and reservoir distribution of the Cambrian carbonate & evaporite paragenesis system in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(6): 11-20.]
- [15] Moore C H, Wade W J. Carbonate reservoirs: Porosity and diagenesis in a sequence stratigraphic framework[M]. Amsterdam: Elsevier, 2013.
- [16] Warren J K. Evaporites: Sediments, resources and hydrocarbons[M]. Berlin: Springer, 2006.
- [17] Warren J K. Evaporites through time: Tectonic, climatic and Eustatic controls in marine and nonmarine deposits[J]. Earth-Science Reviews, 2010, 98(3/4): 217-268.
- [18] Abrantes Jr F R, Nogueira A C R, Soares J L. Permian paleogeography of west-central Pangea: Reconstruction using sabkha-type gypsum-bearing deposits of Parnaíba Basin, northern Brazil[J]. Sedimentary Geology, 2016, 341: 175-188.
- [19] López-Quirós A, Barbier M, Martín J M, et al. Diagenetic evolution of Tortonian temperate carbonates close to evaporites in the Granada Basin (SE Spain)[J]. Sedimentary Geology, 2016, 335: 180-196.
- [20] 胡忠贵,王纪煊,李世临,等. 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, 2023,35(2):113-124. [Hu Zhonggui, Wang Jixuan, Li Shilin, et al. High-frequency sequence division and geological significance of dolomite-evaporite paragenetic strata of Cambrian Gaotai Formation in eastern Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(2): 113-124.]
- [21] 王纪煊,胡忠贵,李世临,等.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/OL]. 沉积学报, doi: 10.14027/j.issn.1000-0550.2022.155. [Wang Jixuan, Hu Zhonggui, Li Shilin, et al. Characteristics and evolution of sedimentary sequences of the Middle Cambrian Gaotai Formation in the Sichuan Basin[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica, doi:

10.14027/j.issn.1000-0550.2022.155.]

- [22] Yan D P, Zhou M F, Song H L, et al. Origin and tectonic significance of a Mesozoic multi-layer over-thrust system within the Yangtze Block (South China)[J]. Tectonophysics, 2003, 361(3/4): 239-254.
- [23] 胡召齐,朱光,刘国生,等. 川东"侏罗山式"褶皱带形成时代:不整合面的证据[J]. 地质论评, 2009, 55 (1): 32-42. [Hu Zhaoqi, Zhu Guang, Liu Guosheng, et al. The folding time of the eastern Sichuan Jura-type fold belt: Evidence from unconformity[J]. Geological Review, 2009, 55(1): 32-42.]
- [24] 黄涵宇. 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), 2018. [Huang Hanyu. Formation and evolution of Paleo-uplift in southeastern Sichuan Basin and its control on hydrocarbon accumulation[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.]
- [25] 李佳,胡忠贵,江梦宇,等. 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, 2023, 13 (1): 94-99. [Li Jia, Hu Zhonggui, Jiang Mengyu, et al. 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, 2023, 13(1): 94-99.]
- [26] 曲长胜,邱隆伟,杨勇强,等.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,2017,91 (3): 605-616. [Qu Changsheng, Qiu Longwei, Yang Yongqiang, et al. 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, 2017, 91(3): 605-616.]
- [27] Kaufman A J, Knoll A H. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: Stratigraphic and biogeochemical implications[J]. Precambrian Research, 1995, 73(1/2/3/4): 27-49.
- [28] Li D, Ling H F, Jiang S Y, et al. New carbon isotope stratigraphy of the Ediacaran-Cambrian boundary interval from SW China: Implications for global correlation[J]. Geological Magazine, 2009, 146(4): 465-484.
- [29] Zhu M Y, Babcock L E, Peng S C. Advances in Cambrian stratigraphy and paleontology: Integrating correlation techniques, paleobiology, taphonomy and paleoenvironmental reconstruction[J]. Palaeoworld, 2006, 15(3/4): 217-222.
- [30] Horacek M, Brandner R, Abart R. 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, 2007, 252(1/2): 347-354.
- [31] Clayton R N, Degens E T. Use of carbon isotope analyses of carbonates for differentiating fresh-water and marine sediments: GEOLOGICAL NOTES[J]. AAPG Bulletin, 1959, 43(4): 890-897.
- [32] Clayton R N, Epstein S. The relationship between O¹⁸/O¹⁶ ratios in coexisting quartz, carbonate, and iron oxides from various geological deposits[J]. The Journal of Geology, 1958, 66(4): 345-371.
- [33] 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.
- [34] 罗顺社,汪凯明.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, 2010, 84(4): 492-499. [Luo Shunshe, Wang Kaiming. Carbon and oxygen isotope composition of carbonatic rock from the Mesoproterozoic Gaoyuzhuang Formation in the Kuancheng area, Hebei province[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(4): 492-499.]
- [35] 陈荣坤. 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, 1994, 12(4): 11-21. [Chen Rongkun. Application of stable oxygen and carbon isotope in the research of carbonate diagenetic environment[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(4): 11-21.]
- [36] 杜洋,樊太亮,高志前. 塔里木盆地中下奧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, 2016, 27(8): 1509-1523. [Du Yang, Fan Tailiang, Gao Zhiqian. 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, 2016, 27(8): 1509-1523.]
- [37] 罗贝维,魏国齐,杨威,等.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,2013,40(4):1099-1111. [Luo Beiwei, Wei Guoqi, Yang Wei, et al. Reconstruction of the Late Sinian paleo-ocean environment in Sichuan Basin and its

geological significance[J]. Geology in China, 2013, 40(4): 1099-1111.]

- [38] Meng F W, Zhang Z L, Schiffbauer J D, et al. The Yudomski event and subsequent decline: New evidence from δ^{34} S data of Lower and Middle Cambrian evaporites in the Tarim Basin, western China[J]. Carbonates and Evaporites, 2019, 34(3): 1117-1129.
- [39] 马永生. 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, 2015. [Ma Yongsheng. Achievements and prospects of natural gas exploration in Changxing Formation-Fixianguan Formation, Northeast Sichuan[R]. Beijing: China Petroleum and Chemical Corporation, 2015.]
- [40] 黄思静. 塔里木盆地塔河油田寒武奧陶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,2009. [Huang, Sijing. Material basis and buried diagenesis of Cambrian-Ordovician deeply buried karst in the Tarim Basin Tahe oilfield[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009.]
- [41] 李斌,彭军,夏青松,等. 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), 2019, 49 (2):
 310-322. [Li Bin, Peng Jun, Xia Qingsong, et al. Dolomitization model of Lower Qiulitage group in Tabei area[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49(2): 310-322.]
- [42] 刘丽红,杜小弟,徐守礼,等.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),2017,47(3):775-784. [Liu Lihong, Du Xiaodi, Xu Shouli, et al. Characteristics and Formation of the Cambrian dolomite in Middle-south Sichuan Basin, China[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017, 47(3):775-784.]
- [43] 赵海形,张永生,邢恩袁,等. 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, 2018, 92 (8):
 1680-1692. [Zhao Haitong, Zhang Yongsheng, Xing Enyuan, et al. 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, 2018, 92(8): 1680-1692.]
- [44] 郑希民,杨柳,易定红,等. 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,2019,39 (4):
 65-70. [Zheng Ximin, Yang Liu, Yi Dinghong, et al. Distrbution of gypsum and sulfur isotopes in the Palaeogene strata, western Qaidam Basin, Qinghai[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2019, 39(4): 65-70.]
- [45] 李庆宽, 樊启顺, 山发寿, 等. 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, 2018, 26(1): 73-80. [Li Qingkuan, Fan Qishun, Shan Fashou, et al. The variation of sulfur isotope in marine-continental evaporites and its geochemical applications[J]. Journal of Salt Lake Research, 2018, 26(1): 73-80.]
- [46] 文华国, 霍飞, 郭佩, 等. 白云岩一蒸发岩共生体系研究进展及展望[J]. 沉积学报, 2021, 39 (6): 1321-1343. [Wen Huaguo, Huo Fei, Guo Pei, et al. Advances and prospects of dolostone-evaporite paragenesis system[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(6): 1321-1343.]
- [47] Xue C, Wei M Y, Li X B, et al. The co-relationship of marine carbonates and evaporites: A study from the Tarim Basin, NW China[J]. Carbonates and Evaporites, 2020, 35(4): 122.
- [48] Evans D G, Nunn J A. Free thermohaline convection in sediments surrounding a salt column[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1989, 94(B9): 12413-12422.
- [49] Hauck T E, Corlett H J, Grobe M, et al. Meteoric diagenesis and dedolomite fabrics in precursor primary dolomicrite in a mixed carbonate–evaporite system[J]. Sedimentology, 2018, 65(6): 1827-1858.
- [50] Yang X Q, Fan T L, Tang S, et al. Sedimentology and sequence stratigraphy of evaporites in the Middle Jurassic Buqu Formation of the Qiangtang Basin, Tibet, China[J]. Carbonates and Evaporites, 2017, 32(3): 379-390.
- [51] Pan H Z, Erwin D H. Gastropods from the Permian of Guangxi and Yunnan provinces, South China[J]. Journal of Paleontology, 2002, 76(S56): 1-49.
- [52] 张琼. 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, 2021. [Zhang Qiong. 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, 2021.]
- [53] Meng F W, Zhang Y S, Galamy A R, et al. Ordovician seawater composition: Evidence from fluid inclusions in halite[J]. Geological Quarterly, 2018, 62(2): 344-352.

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 PetroChina, 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, and Fe, Mn and S isotopic signatures. 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 geochemical features include δ ¹⁸O, mainly in the range -8% to -9%, and δ^{13} C in the range -8% to 9% but mainly concentrated between -1% and 3%. Calculations of paleosalinity and paleotemperature using these isotope values gave the vast majority of Z>120% and δ^{13} C>-2‰, with paleoseawater temperatures in the range 23.10 °C-40.64 °C. Fe was mainly concentrated in the range 0-2 000×10^{-5} , and Mn from 10^{-5} to 30×10^{-5} . These indicate a warm or hot paleoclimate and saline seawater environment in the Gaotai Group 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"). [Conclusion] 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