

塔西台地寒武纪沉积环境演化与海陆耦合

刘沛显¹ 关平¹ 冯帆¹ 贾文博¹ 张巍¹ 邓世彪¹ 金亦秋²

(1.北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室 北京大学地球与空间科学学院 北京 100871;

2.中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院 北京 100083)

摘要 碳酸盐岩台地作为陆地与深海间的过渡带,其沉积记录了海洋和邻近陆地的演化。结合已有的沉积学工作,对塔里木盆地西部台地寒武系碳酸盐岩进行全岩及酸不溶物地球化学研究。塔西台地寒武纪主要发育局限台地、局限—蒸发台地或蒸发台地相沉积。碳酸盐岩的地球化学特征主要受沉积环境和成岩作用影响,对研究区寒武系白云岩来说,其元素组成极易受沉积微相的控制,氧同位素组成则很可能已被成岩作用改造,仅原生、准同生白云岩的 Sr/Ba、Fe/Mn 和 C 同位素可反映沉积相演化对应的古盐度、离岸距离等沉积环境特征的变化,酸不溶物化学蚀变指数(CIA 值)则指示邻近陆地的化学风化强度与气候特征。寒武纪时期,塔西台地在相对海平面较高时发育局限台地相沉积,以水体盐度较低、沉积环境离岸较远和生物活动相对较弱为特征,陆地化学风化强度适中,气候温暖湿润;在相对海平面较低时发育蒸发台地相沉积,具有水体盐度较高、沉积环境离岸较近和生物活动相对较强等特点,陆地化学风化强烈,气候炎热极端;在相对海平面适中时发育局限—蒸发台地,沉积环境和邻近陆地的特征介于前述二者之间。沉积相演化对应的较长周期的海陆演化可能主要受全球海平面升降及宏观气候变化控制,具体表现为相对海平面升降所导致的海相沉积环境的变化,以及气候变化引起的陆地化学风化强度的变化。寒武纪塔西台地所处区域的海洋—陆地演化具有高度耦合的特征。

关键词 塔西台地 寒武系白云岩 沉积环境 酸不溶物 CIA 海陆耦合

第一作者简介 刘沛显 男 1993 年出生 博士研究生 沉积学与沉积地球化学 E-mail:liupeixian@pku.edu.cn

通讯作者 关平 男 教授 E-mail:pguanl@pku.edu.cn

中图分类号 P534.41 **文献标识码** A

0 引言

碳酸盐岩台地(Carbonate Platform)泛指一切以发育碳酸盐沉积物为主的浅水环境^[1]。作为陆地和深海盆地之间的过渡带,其沉积特征主要受相对海平面变化和沉积作用控制,同时也记录了陆地对沉积环境的影响,因此可以利用碳酸盐岩间接恢复海相沉积环境及邻近陆地的特征与演化。自 Rubey^[2] 首先系统关注地质历史上海洋的演化以来,利用碳酸盐岩的地球化学特征研究沉积水体化学性质^[3-4]、地质历史上的重大事件^[5-7] 和地球外部圈层中元素的循环^[8-9] 已成为地球科学重要的研究方向。但目前为止,除了用以研究地表风化作用以外^[10],很少有人关注海相碳酸盐岩中含量甚少的非碳酸盐组分所携带的古环境、古气候信息^①。

寒武纪时期,塔里木地块整体处于被动陆缘拉张构造背景下^[11],区内发育塔西、罗西和库鲁克塔格 3 个孤立碳酸盐台地,其中以位于现今盆地中西部的塔西台地面积最大^[12],发育一套千余米厚的以白云岩为主的地层^[13]。前人在寒武纪塔西台地的构造背景^[11,14-16]、沉积相特征及组合^[17-18]、层序划分与对比^[17,19-20]、古地理重建^[12,21] 等方面已做过许多卓有成效的工作,为之后的地球化学研究打下坚实的基础。陈永权等^[22-23] 和郑剑锋等^[24] 根据岩石学和地球化学特征划分出不同类型的白云岩,并总结出相应的成因机制。沉积环境对于碳酸盐岩的化学组成有较明显的影响^[25],因此可以利用塔西台地寒武系白云岩的地球化学特征反演其沉积环境的演化^[26-27],并间接指示海平面变化^[28-30]。但是,目前对反映塔西台地寒武纪沉积环境演化的有效地球化学指标缺乏

收稿日期:2015-09-06;收修改稿日期:2016-03-28

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2012CB214801);国家科技重大专项(2011ZX05009-002-403,2011ZX05004-004-005) [Foundation: National Key Basic Research Program of China(973 Program), No.2012CB214801; National Science and Technology Major Project, No.2011ZX05009-002-403, 2011ZX05004-004-005]

①Feng F, Guan P, Liu W H, et al. Geochemistry of Altungol cap dolostones from the Tarim Basin, NW China[J]. Arabian Journal of Geosciences, Accepted.

分析与评估,对沉积记录所携带的台地周缘陆地化学风化背景的信息尚未进行挖掘,对海洋与陆地演化的关系及控制因素也有待关注与探讨。

结合沉积学研究,通过分析塔西台地寒武系白云岩沉积相、沉积微相对元素组成的影响,以及成岩作用对同位素组成可能造成的干扰,总结出能够反映与沉积相演化对应的沉积环境变化的地球化学指标。利用元素、同位素特征指示沉积环境演变及相对海平面变化,利用酸不溶物化学蚀变指数(chemical index of alteration, CIA 值)指示台地邻近陆地的化学风化强度和气候特征,由此出发,讨论寒武纪塔西台地海洋—陆地演化间的联系及其控制因素。

1 区域地质背景

塔里木盆地位于中国西北的新疆维吾尔自治区,南、北分别被西昆仑—阿尔金山和天山所环绕,是中国最大的含油气沉积盆地(5.6×10⁵ km)^[16]。盆地以太古宇—中元古界结晶岩系为基底,震旦系及之上沉积为盖层,是一个由古生代克拉通盆地和中新生代前陆盆地叠加而成的多旋复合盆地^[11,15]。寒武纪时期,塔里木地块处于南半球较低纬度,是冈瓦纳大陆的周缘块体^[31-32],总体处于拉张构造背景下,大致可分为西部克拉通内坳陷和东部克拉通边缘坳陷两部分,整体具有“西高东低”的沉积格局^[15],盆地内发育塔西、罗西及库鲁克塔格3个孤立碳酸盐岩台地,台地间发育斜坡相和深水盆地相沉积^[12]。

研究的样品主要来自塔北西部柯坪断隆上的肖尔布拉克东沟剖面与塔中隆起 ZS1 井的寒武系地层(图1)。寒武纪时期,采样点均位于塔西台地内部^[12,21]。塔西台地寒武系为一套千余米厚的海相碳酸盐岩为主的地层,垂向上主要表现为:底部为硅质岩、含磷硅质岩,白云岩,中部为膏质、含膏白云岩夹白云岩、灰岩、膏岩,上部为白云岩。地层概况如图2所示。

2 分析测试方法

样品的采集和处理尽可能避免了次生裂隙、脉体以及溶蚀孔、晶洞等后期作用改造的影响,选取新鲜的白云岩进行分析测试。

对 ZS1 井的样品,在岩石薄片观察的基础上,利用微钻(型号 SDE-H37L1 MARATHON,钻头直径 0.2~1 mm)钻取样品的新鲜部分(避开裂隙、脉体、溶蚀孔、晶洞),对钻取的粉末进行元素、碳氧同位素分析。

提取肖尔布拉克东沟剖面样品的酸不溶物,进行

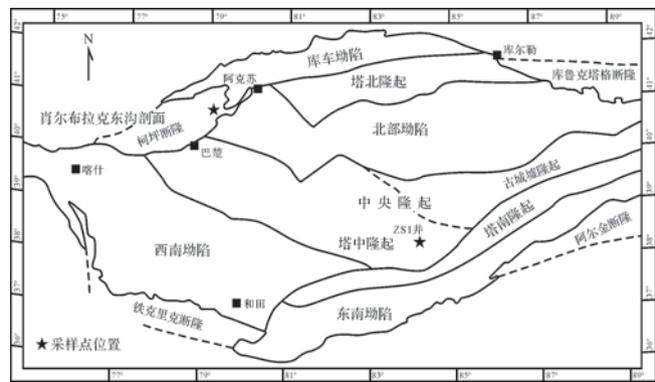


图1 塔里木盆地构造区划及样品采集位置 (据文献[14],有改动)

Fig.1 Tectonic sketch map of Tarim Basin and sample locations (modified from [14])

系	统	组	岩性柱	岩性与厚度
寒武系	上寒武统	下丘里塔格组		白云岩为主,发育含膏白云岩和灰质白云岩夹层(300~576 m)
		阿瓦塔格组		含膏白云岩和白云岩为主,发育含膏泥岩、膏盐层及灰质泥岩夹层(143~542 m)
	中寒武统	沙依里克组		主要发育白云质灰岩、含膏白云岩、泥质灰岩和泥质白云岩(75~325 m)
		吾松格列组		白云岩和瘤状白云岩为主,顶部发育泥页岩段(60~160 m)
	下寒武统	肖尔布拉克组		白云岩、藻白云岩(110~160 m)
		玉尔吐斯组		底部以磷块岩、硅质岩和泥岩为主,中上部发育藻白云岩、砂质白云岩和瘤状灰岩(8~35 m)

图2 塔西台地寒武系地层格架及岩性描述 (据文献[13],有改动)

Fig.2 Cambrian stratigraphic framework and lithological description of the western Tarim platform(modified from [13])

常量、微量元素的分析测试。碳酸盐岩酸不溶物的提取参考了 SY/T 5516—2000 标准《碳酸盐岩化学分析方法》^[33]和王世杰等^[10]的方法,具体步骤如下:取 0.5~1 kg 原岩样品,无污染粗碎为 0.5 cm 左右的碎块,挑选其中不含裂隙、脉体、溶孔或晶洞的碎块约 100 g,放入 500 mL 的大烧杯中,加入适量的 1 mol/L 盐酸,连续搅拌 15 min,静止沉淀至不冒气泡为止(用 pH 试纸检测,上层清液为中性);抽滤上层清液,将滤出的残渣冲入烧杯,继续加入适量 1 mol/L 的盐酸,重复上述步骤,直至加入的盐酸不反应(用 pH 试

纸检测,此时的淋滤液 $\text{pH} \leq 4$);单个样品的提取时间约需 24~48 h;把溶解残余的样品用去离子水反复清洗,用 pH 试纸检测至清洗液呈中性为止,转入蒸发皿中,放入烘箱烘干,装入洁净的样品袋中待测。碳酸盐岩样品与盐酸反应后,其中的碳酸盐矿物全部被分解为金属离子和 CO_2 气体,石膏等蒸发盐类矿物溶解于液相中,不溶物包括石英、黏土矿物等。对酸不溶物进行常量和微量元素分析。

样品分析测试均在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成,其中,常量元素和微量元素测试分别使用 PW2404 型 X 射线荧光光谱仪和 ELEMENT XR 型等离子质谱仪,碳氧同位素测试使用标准的无水磷酸消解法,在 MAT 253 型稳定同位素质谱仪上完成。测试结果见表 1、2 和 3。

表 1 ZS1 井中上寒武统白云岩 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 分析测试结果

Table 1 Stable carbon- and oxygen- isotopic composition of Middle-Upper Cambrian carbonates in Well ZS1

样号	层位	深度/m	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$
1	阿瓦塔格组	6 402	1.3	-7.7
2	阿瓦塔格组	6 406	0.4	-6.3
3	阿瓦塔格组	6 410	1.7	-6.9
4	阿瓦塔格组	6 412	2.6	-5.3
5	阿瓦塔格组	6 416	2.6	-5.8
6	阿瓦塔格组	6 424	2.4	-7.1
7	阿瓦塔格组	6 430	1.1	-7.8
8	阿瓦塔格组	6 436	0.9	-8.1
9	阿瓦塔格组	6 442	1.8	-7.7
10	阿瓦塔格组	6 454	1	-6.8
11	阿瓦塔格组	6 556	1.4	-5.8
12	阿瓦塔格组	6 458	1	-6.7
13	阿瓦塔格组	6 460	-1.2	-7
14	阿瓦塔格组	6 462	0.2	-6.4
15	阿瓦塔格组	6 466	0	-5.4
16	阿瓦塔格组	6 468	-0.1	-5.4
17	阿瓦塔格组	6 470	-0.7	-5.5
18	阿瓦塔格组	6 472	0.4	-5.6
19	阿瓦塔格组	6 474	-0.2	-5
20	阿瓦塔格组	6 476	1.4	-4.9
21	阿瓦塔格组	6 492	-1.2	-6.3
22	沙依里克组	6 506	0.1	-6.1
23	沙依里克组	6 510	0.2	-5.8
24	沙依里克组	6 518	0.2	-6.6
25	沙依里克组	6 526	0.5	-6.2
26	沙依里克组	6 534	-1	-6.3
27	沙依里克组	6 538	0.1	-6.2
28	沙依里克组	6 542	0.2	-5.8
29	沙依里克组	6 552	-0.1	-6.4
30	沙依里克组	6 554	-0.2	-6
31	沙依里克组	6 560	-2.5	-6.4

3 塔西台地寒武系沉积相模式与沉积相演化

构造运动、海平面变化和沉积作用三者共同影响碳酸盐岩台地沉积相的演化^[1],台地内古地貌则控制着沉积亚相、微相的展布^[34]。寒武纪时塔西台地为典型的孤立台地,根据其岩相特征与岩石组合,可大致划分出蒸发台地、局限台地、开阔台地、台地边缘浅滩、台地边缘礁、台地边缘斜坡、浅水陆棚、深水陆棚和盆地等 9 个沉积相,并可进一步划分出潮坪、瀉湖、台内滩和滩间海等沉积亚相以及云坪、膏云坪和泥云坪等沉积微相。本研究所涉及的 ZS1 井和肖尔布拉克东沟剖面均位于台地内部^[12],主要发育蒸发台地、蒸发—局限台地或局限台地相沉积,沉积相划分及对应的岩性特征(表 4、图 3)。

塔西台地寒武系自下而上可分为下寒武统玉尔吐斯组、肖尔布拉克组和吾松格尔组,中寒武统沙依里克组、阿瓦塔格组和上寒武统下丘里塔格组。整个寒武系大体可划分为 6 个三级层序(图 4):早寒武世早期,发生的一次“海进”,形成了玉尔吐斯组浅水陆棚相泥岩、硅质岩和磷块岩($\in \text{SQ I}$);之后发生了较为持续的“海退”,发育局限台地乃至局限—蒸发台地,沉积了肖尔布拉克组、吾松格尔组和沙依里克组下部潮间、潮下带白云岩($\in \text{SQ II} - \in \text{SQ III}$);中寒武统沙依里克组上部发育局限台地相沉积,代表一次“海进”,随后出现寒武纪最大规模“海退”,形成了阿瓦塔格组蒸发台地相含膏、盐碳酸盐岩夹钙质泥岩,组成了 $\in \text{SQ IV}$;晚寒武世下丘里塔格组主要为局限台地相白云岩、藻白云岩,相比阿瓦塔格期水体变深,总体为持续的“海进”过程($\in \text{SQ V} - \in \text{SQ VI}$)。

4 塔西台地寒武系沉积环境特征与海陆演化

4.1 样品成岩作用评价

海相碳酸盐岩的地球化学组成兼受沉积环境和成岩作用影响。利用其地球化学特征恢复沉积环境,需要首先评估成岩作用对岩石化学组成的影响。本研究中,对样品进行地球化学分析时,以薄片观察结果为指导,用微钻(钻头直径 0.2~1 mm)钻取未受裂隙、脉体、溶蚀孔或晶洞等次生作用改造的,岩性为泥粉晶白云岩、泥晶颗粒白云岩或含膏泥晶白云岩(如图 3)的样品进行分析测试,岩石学特征反映其未受成岩作用过程中流体(包括热液)的明显改造。

表 2 ZS1 井中下寒武统碳酸盐岩样品沉积相及化学组成

Table 2 Sedimentary facies and element concentrations of Lower-Middle Cambrian carbonates in Well ZS1

序 号	样品 编号	深度 /m	层位	岩性	沉积相	沉积微相	CaO /%	MgO /%	SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	K ₂ O /%	Fe ₂ O ₃ /%	MnO /%	烧失量 /%	Sr /10 ⁻⁶	Ba /10 ⁻⁶	Cr /10 ⁻⁶	Sr/Ba	Fe/Mn
1	ZS1-2	6.409	阿瓦塔格组	含膏白云岩	蒸发台地	膏云坪	32.76	15.59	5.25	0.66	0.29	0.46	0.005	31.18	1 273	2 286	15.2	0.556 9	83.13
2	ZS1-4	6.424	阿瓦塔格组	含膏白云岩	蒸发台地	膏云坪	31.16	16.4	6.66	0.98	0.50	0.48	0.005	32.52	1 805	2 456	20.6	0.734 9	86.57
3	ZS1-6	6.441	阿瓦塔格组	含膏白云岩	蒸发台地	膏云坪	31.88	15.88	6.76	0.56	0.25	0.51	0.008	31.47	2 934	3 102	31.9	0.945 8	57.16
4	ZS1-7	6.451	阿瓦塔格组	含膏白云岩	蒸发台地	膏云坪	29.82	12.3	12.05	2.20	0.92	1.02	0.011	23.88	2 592	4 002	27.5	0.647 7	83.79
5	ZS1-9	6.469	阿瓦塔格组	含膏泥质白云岩	蒸发台地	膏泥云坪	29.46	11.79	12.05	2.61	1.48	1.38	0.012	22.29	—	3 167	23.8	—	103.92
6	ZS1-11	6.482	阿瓦塔格组	含膏泥质白云岩	蒸发台地	膏泥云坪	29.56	10.33	13.75	2.95	1.70	1.42	0.013	16.17	—	3 361	25.8	—	98.70
7	ZS1-13	6.496	阿瓦塔格组	泥粉晶白云岩	局限台地	云坪	29.7	20.32	3.21	0.29	0.17	0.26	0.007	45.43	322	2 364	20.9	0.136 2	34.08
8	ZS1-16	6.528	沙依里克组	残余砂屑白云岩	局限台地	云坪	30.3	21.12	0.636	0.14	0.09	0.14	0.005	47.32	158	1 894	12.5	0.083 4	24.94
9	ZS1-18	6.540	沙依里克组	泥粉晶白云岩	局限台地	云坪	27.41	18.9	1.43	0.14	0.13	0.15	0.006	51.36	236	2 847	12.2	0.082 9	21.99
10	ZS1-24	6.692	吾松格组	含泥白云岩	局限—蒸发台地	瀉湖	27.71	18.67	10.44	1.24	0.73	0.74	0.011	36.75	746	1 666	25.2	0.447 8	60.95
11	ZS1-25	6.754	吾松格组	含膏白云岩	局限—蒸发台地	瀉湖	25.97	16.13	12.57	2.68	1.37	3.32	0.038	34.62	1 679	4 295	69.9	0.390 9	78.95
12	ZS1-26	6.756	吾松格组	含泥白云岩	局限—蒸发台地	瀉湖	25.23	16.35	15.63	2.73	1.15	2.00	0.037	35.91	402	4 578	65.9	0.087 8	48.85
13	ZS1-27	6.759	吾松格组	含泥白云岩	局限—蒸发台地	瀉湖	24.08	16.36	16.38	3.34	1.71	1.82	0.033	35.37	475	2 730	50.7	0.174 0	49.84
14	ZS1-28	6.761	吾松格组	泥晶白云岩	局限—蒸发台地	瀉湖	20.88	13.89	25.7	4.42	1.81	2.20	0.039	29.88	630	2 073	58.7	0.303 9	50.97
15	ZS1-29	6.763	吾松格组	含泥白云岩	局限—蒸发台地	瀉湖	24.3	16.44	17.83	3.48	1.56	2.17	0.035	33.4	659	3 327	95.7	0.198 1	56.03
16	ZS1-30	6.765	吾松格组	含泥白云岩	局限—蒸发台地	瀉湖	25.03	17.03	14.48	2.24	1.18	2.04	0.032	37.35	683	2 457	72.5	0.278 0	57.61
17	ZS1-31	6.767	吾松格组	含泥砂屑白云岩	局限—蒸发台地	膏泥云坪	25.6	17.59	14.58	2.00	0.96	1.52	0.028	36.96	631	4 231	113	0.149 1	49.05
18	ZS1-32	6.769	吾松格组	含膏砂屑白云岩	局限—蒸发台地	膏泥云坪	26.65	18.27	11.5	1.34	0.73	1.36	0.030	39.73	703	3 667	45.1	0.191 7	40.96
19	ZS1-33	6.771	吾松格组	含膏砂质白云岩	局限—蒸发台地	膏泥云坪	23.95	16.91	13.04	2.07	1.00	1.32	0.028	37.94	753	3 089	42.8	0.243 8	42.60
20	ZS1-34	6.773	肖尔布拉克组	含泥砂屑白云岩	局限—蒸发台地	膏泥云坪	26.61	17.69	10.32	1.55	0.80	2.78	0.041	39.97	600	1 519	159	0.395 0	61.27
21	ZS1-36	6.777	肖尔布拉克组	含膏泥质白云岩	局限—蒸发台地	膏泥云坪	25.65	17.94	11.08	1.61	0.89	2.66	0.041	39.67	584	1 668	51	0.350 1	58.63
22	ZS1-38	6.781	肖尔布拉克组	泥粉晶白云岩	局限台地	云坪	28	19.62	4.68	0.75	0.40	1.02	0.030	45.13	214	2534	36.4	0.0845	30.72
23	ZS1-40	6.785	肖尔布拉克组	残余鲕粒白云岩	局限台地	云坪	29.57	20.69	2.29	0.35	0.19	0.77	0.032	45.82	89.3	928	22.7	0.0962	21.77

表 3 肖尔布拉克东沟中上寒武统碳酸盐岩酸不溶物化学组成及 CIA 值

Table 3 Acid-insoluble residua's element concentrations and values of chemical index of alteration (CIA) for Middle-Upper Cambrian carbonates from outcrops in east gully of Xiaoerbulake

样品编号	层位	厚度 /m	粗碎样品质量 /g	酸不溶物质量 /g	SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	CaO /%	Na ₂ O /%	K ₂ O /%	CIA
XD-38	下丘里塔格组	671.8	100.36	2.65	82.40	8.51	0.11	0.13	2.51	73.12
XD-35	下丘里塔格组	580.6	205.53	7.57	88.36	5.04	0.07	0.07	0.89	80.60
XD-31	阿瓦塔格组	433.1	100.24	6.05	52.80	11.16	0.09	0.11	0.63	91.44
XD-30	阿瓦塔格组	379.2	200.32	4.51	77.01	9.09	0.10	0.09	1.06	86.14
XD-29	阿瓦塔格组	369.8	406.95	2.56	37.68	11.11	0.19	0.22	0.79	87.63
XD-25	沙依里克组	312.2	100.19	20.70	84.84	8.70	0.07	0.06	0.63	90.42
XD-24	沙依里克组	278.9	100.43	4.94	71.10	14.27	0.10	0.10	3.84	76.01
XD-22	沙依里克组	259.6	100.63	4.96	65.48	14.73	0.08	0.10	8.51	60.69

注:表中厚度以肖尔布拉克东沟剖面寒武系底界为 0 m;酸不溶物质量<1 g 的样品无法进行常量元素测试,因此无法测定其 CIA 值。

理想状况下,无杂质的沉积白云岩接近化学计量组成(CaO_(wt) = 30.4%, MgO_(wt) = 21.7%, Ca/Mg_(mol/mol) = 1 : 1)^[35],但白云岩沉积时 Sr²⁺、Ba²⁺、Mn²⁺等离子常会占据晶格中的阳离子位置,使岩石中 CaO 与 MgO 含量同时降低,但 Ca/Mg 比值仍保持恒定,因此沉积白云岩的 CaO 和 MgO 含量呈线性正相关,在 CaO_(wt)-MgO_(wt) 关系图解中均落在沉积线上(如图 5);而交代白云石是以 Mg²⁺ 替换方解石晶格中的

Ca²⁺形成的,随着白云岩化作用的不断深入, CaO 含量不断降低, MgO 含量不断升高,因此交代白云岩的 CaO 和 MgO 含量具有线性负相关关系^[23,36],在 CaO_(wt)-MgO_(wt) 关系图解中落在交代线附近。ZS1 井中下寒武统的白云岩样品中,下寒武统和中寒武统沙依里克组的样品均落在沉积线附近;中寒武统阿瓦塔格组的样品点虽落在沉积线以下,但并不与交代线平行,可能指示了该组样品中有少量的含 Ca 物质混

入,镜下观察发现阿瓦塔格组样品中均含有一定量的石膏(图3e),可能是造成该组样品点偏离沉积线的原因。综上,样品的 $\text{CaO}_{(wt)}-\text{MgO}_{(wt)}$ 关系反映其未受明显的交代作用。

碳酸盐岩中 Ba 与 Mn 的相对含量也可指示碳酸盐岩受成岩作用改造的程度。由于 Ba^{2+} (0.135 nm) 的离子半径远大于 Mn^{2+} (0.067 nm), 因此 Mn^{2+} 较 Ba^{2+} 更易进入晶格,若无高 Ba、低 Mn 的流体交代,随着成岩作用的增强,岩石中 Ba 含量会不断减少, Mn 含量则不断增加, Ba/Mn 值将会不断减小。前人对

塔西台地下古生界白云岩的研究表明,除经二叠系岩浆热液(173℃~200℃)改造形成的中粗晶鞍状白云石具有高 Ba ($>1\,000\times 10^{-6}$)、低 Mn ($<100\times 10^{-6}$) 的特点外,其余各期成岩作用改造的白云石的 Ba 含量均较低 ($<30\times 10^{-6}$) [13, 37-38]。本研究中样品具有 Ba 含量高 ($928\sim 4\,578$) $\times 10^{-6}$ 、Mn 含量相对较低 ($38\sim 317$) $\times 10^{-6}$ 的特征,且所选取的样品均为泥粉晶白云岩, $\text{CaO}_{(wt)}-\text{MgO}_{(wt)}$ 关系图也反映样品并未经较强的交代作用影响。因此样品的原始元素组成特征应当未经历成岩作用明显改造。

表4 塔西台地寒武系碳酸盐岩沉积相划分

Table 4 Sedimentary facies model of Cambrian carbonates in the western Tarim carbonate platform

相	亚相	微相	岩性特征
蒸发台地	盐湖	膏岩、盐岩坪	石膏、硬石膏、盐岩、含膏质泥晶白云岩,少量泥岩、石膏质泥岩
		潮坪	薄层白云质膏岩,膏质白云岩
		膏云坪(萨布哈)	白云岩,石膏质白云岩,泥岩,含膏泥质白云岩,较厚层蒸发岩、膏溶角砾岩,常见石盐、石膏假晶
局限台地	潮坪	泥云坪	白云岩、白云质灰岩,夹陆源碎屑成因泥岩、泥云岩、泥质灰岩,白云岩含量50%以上
		云坪	准同生白云岩60%以上,夹少量泥页岩、泥质灰岩、云斑灰岩。硅质条带、硅质团块,硅质白云岩
		灰云坪	白云岩、白云质灰岩,夹陆源碎屑成因泥岩、泥云岩、泥质灰岩,白云岩含量50%以上
	潟湖	灰云坪	白云岩、白云质灰岩、豹皮灰岩以及少量泥晶灰岩
		灰坪	灰色厚层泥粉晶灰岩、藻纹层灰岩夹白云岩
		灰泥坪	砂岩、粉砂岩、泥岩夹泥灰岩和灰岩
		砂屑滩、生屑滩	紫红色或灰色泥质灰岩、泥晶灰岩,(含)生屑、砂屑、球粒、藻屑泥晶灰岩(白云岩),广盐性生物、藻类发育
滩间海	—	泥晶砂屑灰岩、泥晶生屑灰岩、泥晶鲕粒灰岩、泥晶为主含少量亮晶砂屑、鲕粒灰岩(或白云岩)	
		泥粉细晶灰岩、泥晶灰岩、泥质灰岩(或白云岩)	

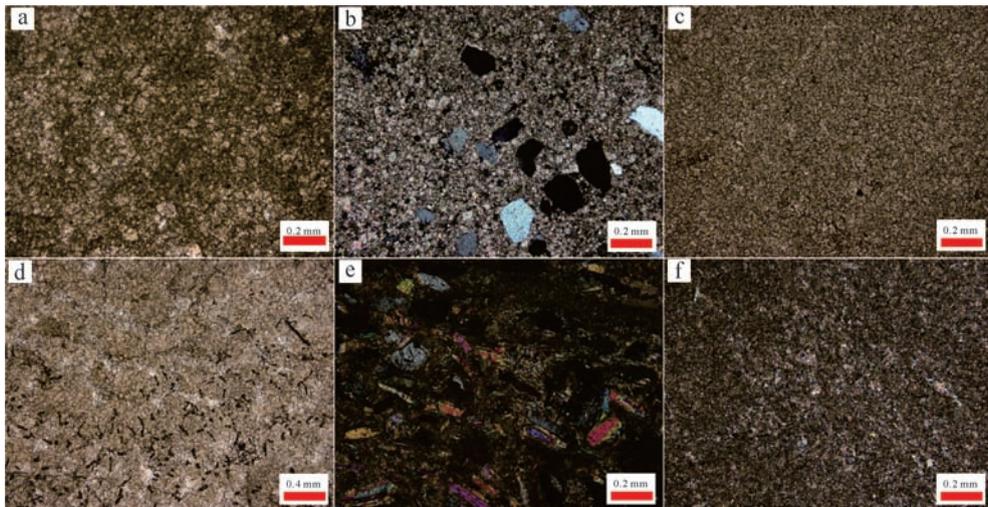


图3 ZS1井中下寒武统岩性特征

a. ZS1-38, 6 781 m, 肖尔布拉克组局限台地相云坪微相泥粉晶白云岩,单偏光,10 \times ; b. ZS1-33, 6 771 m, 吾松格尔组局限—蒸发台地相膏泥云坪微相含石英泥粉晶白云岩,单偏光,10 \times ; c. ZS1-28, 6761 m, 吾松格尔组局限—蒸发台地相潟湖微相泥粉晶白云岩,单偏光,10 \times ; d. ZS1-16, 6 528 m, 沙依里克组局限台地相云坪微相泥粉晶白云岩,单偏光,5 \times ; e. ZS1-11, 6 482 m, 阿瓦塔格组蒸发台地相膏泥云坪微相含石英膏质泥晶白云岩,正交光,10 \times ; f. ZS1-7, 6 451 m, 阿瓦塔格组蒸发台地相膏云坪微相含膏泥晶白云岩,正交光,10 \times 。

Fig.3 Lithologic features of samples in Well ZS1

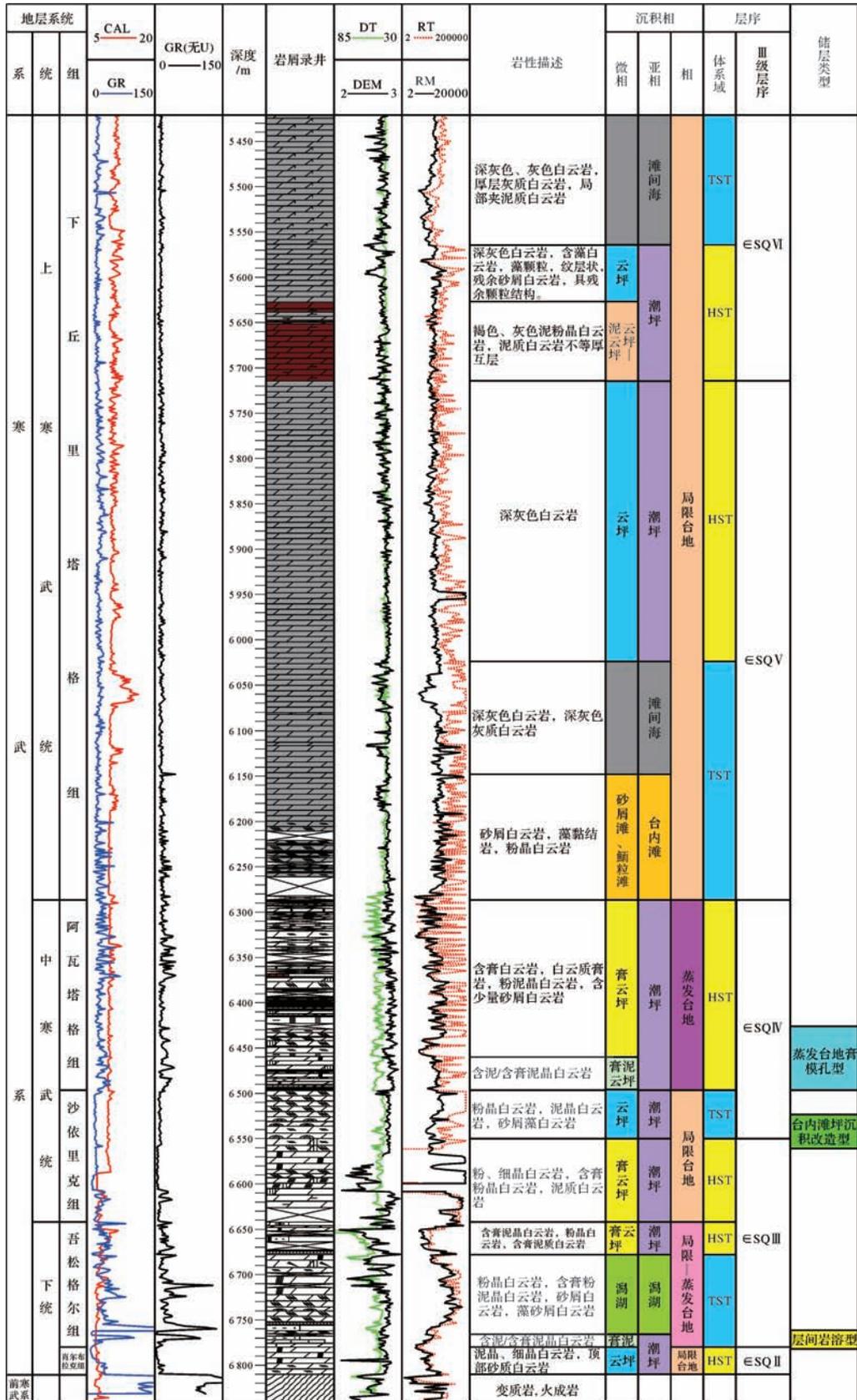


图4 ZS1井沉积储层综合柱状图(1:3000)

Fig.4 Synthetic histogram of Well ZS1

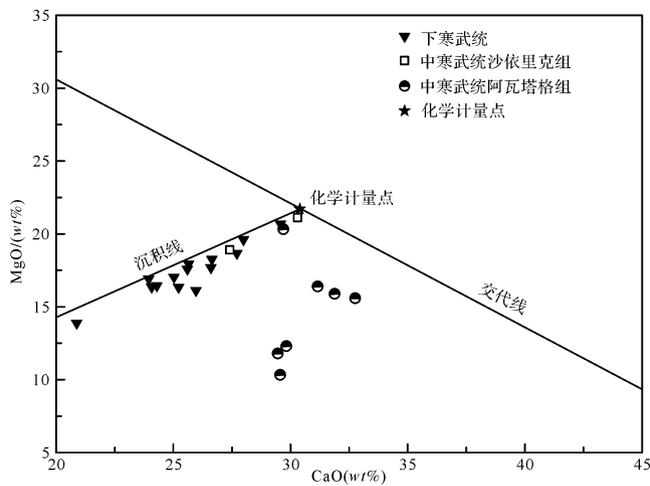


图5 ZS1井中下寒武统碳酸盐岩样品
CaO(wt%)-MgO(wt%)关系

Fig.5 CaO(wt%)-MgO(wt%) relations of Lower-Middle Cambrian carbonates in Well ZS1

综合以上证据,可以认为样品保留了原始的元素地球化学特征,可用于研究其沉积环境的特征与演化。

4.2 海洋沉积环境的演化

4.2.1 沉积水体古盐度变化

海相碳酸盐岩中许多微量元素的比值被用以反应沉积水体的古盐度,如 Sr/Ba、B/Ga 等。其指相机理是:当河水和海水混合时,淡水中的 Ba^{2+} 易与海水中的 SO_4^{2-} 结合成 $BaSO_4$ 沉淀;而 $SrSO_4$ 的溶解度很大, Sr^{2+} 得以继续迁移到远海,在生物作用的介入下沉积下来。沉积水体的盐度越高, Ba^{2+} 越容易在海陆过渡相(如三角洲)沉积中富集,海相沉积物(如台地、盆地相沉积)的 Sr/Ba 比值就越高。因此, Sr/Ba 比可用于确定沉积水体的古盐度^[39]。如图6所示, ZS1井中下寒武统白云岩样品 Sr/Ba 比的整体特点为:蒸发台地>局限—蒸发台地>局限台地。Sr/Ba 所反映的水体古盐度变化符合从局限台地到局限—蒸发台地再到蒸发台地,沉积水体局限程度不断加大,盐度不断升高的特征,水体古盐度变化与沉积相演化基本一致。

4.2.2 沉积环境离岸距离与相对海平面变化

Cr 元素在正常海水中多以 Cr^{3+} 离子的形式出现,通常较为稳定的存在于溶液中,趋向于聚集并沉淀在水深较大的地方,与其他元素相比,会相对富集在离岸较远的沉积环境中^[25,40]。因此,可利用海相沉积岩中 Cr 的含量指示沉积环境的离岸距离,并间

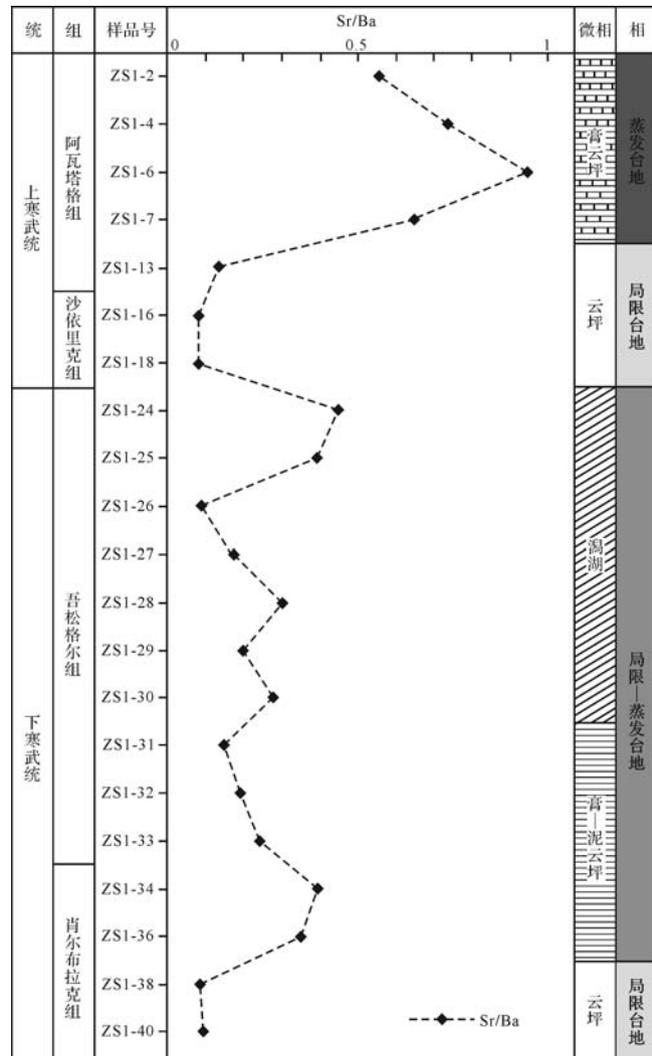


图6 ZS1井中下寒武统碳酸盐岩样品 Sr/Ba 变化
及沉积相演化

Fig.6 Variation of Sr/Ba and sedimentary facies of Lower-Middle Cambrian carbonates in Well ZS1

接反映古水深(相对海平面变化)^[25,40]。Mn 与 Cr 的行为相似,趋向于沉淀在离岸较远、水深较大的沉积环境中^[28]。 Fe^{3+} 在海水中的性质与 Mn^{2+} 和 Cr^{3+} 恰好相反,与其他元素相比更倾向于沉淀在离岸较近、水体较浅的地方。因此,通常情况下,碳酸盐岩中的 Fe(III) 的含量也可指示沉积环境的离岸距离,并且与 Mn 的趋势相反,而 Fe/Mn 可更加明显的反映出沉积环境离岸距离的变化,间接指示相对海平面的变化。

如图7a所示, ZS1井中下寒武统样品的 Mn、Cr 和 Fe 的含量受沉积微相控制明显。在瀉湖、膏—泥云坪微相的样品中表现为富集,而在膏云坪、云坪等微相的样品中则含量较低,其原因可能与不同微相沉积物组成的差异有关。瀉湖、膏泥云坪微相下沉积物

中陆源硅酸盐的含量较高(图10),K、Al、Si含量的高度一致性表明碳酸盐岩样品中所含的陆源硅酸盐以黏土矿物和长石为主,这两种矿物本身较碳酸盐矿物具有更高的Mn、Cr和Fe含量,且黏土矿物的吸附作用会使这些元素更加富集。因此使得这些元素的绝对含量主要受沉积物组成、即沉积微相控制。进一步分析可发现,沉积微相一致时,Mn、Cr的含量会随着沉积环境离岸距离的增大而升高,例如,同为膏泥云坪微相,局限—蒸发台地相(离岸较远,相对海平面较高)的ZS1-31~ZS1-36中Mn、Cr含量较高,蒸发台地相(离岸最近,相对海平面最低)的ZS1-9、ZS1-11则相对较低。以上分析表明,尽管单个元素的含量可能会随离岸距离的变化而表现出一定的趋势,但其更多地受到沉积物组成即沉积微相的影响,难以直观反映沉积相演化对应的离岸距离、相对海平面的变化。

选择沉积趋向性相反的元素进行对比,可以在一定程度上排除沉积微相的干扰。对比不同沉积相Fe和Mn的含量可发现(图7a):局限台地(离岸最远,

相对海平面最高)和局限—蒸发台地相(离岸较远,相对海平面较高)样品中Mn较Fe更富集,而在蒸发台地相(离岸较近,相对海平面较低)中,Fe相对于Mn更富集。样品的Fe/Mn值可以更直观地反映出不同沉积的离岸距离的变化,间接指示相对海平面变化(图7b),Fe/Mn值的总体特点为蒸发台地相(离岸最近,相对海平面最低)>局限—蒸发台地相(离岸较远,相对海平面较高)>局限台地相(离岸最远,相对海平面最高)。与单个元素相比,利用Fe/Mn等元素比值指示沉积环境的离岸距离不易受到其他因素干扰,能较好的指示相对海平面的变化。Fe/Mn值反映的沉积环境离岸距离和间接指示的相对海平面变化与沉积相演化具有高度一致性,说明寒武纪时期塔西台地沉积相的发育和演化主要受相对海平面变化控制。

4.2.3 碳氧同位素指示的沉积环境变化

碳氧同位素常可以反映碳酸盐岩沉积环境的特征。但与碳同位素相比,氧同位素更易受到成岩作用的改造,原因有二:①随着埋藏加深、成岩环境温度升

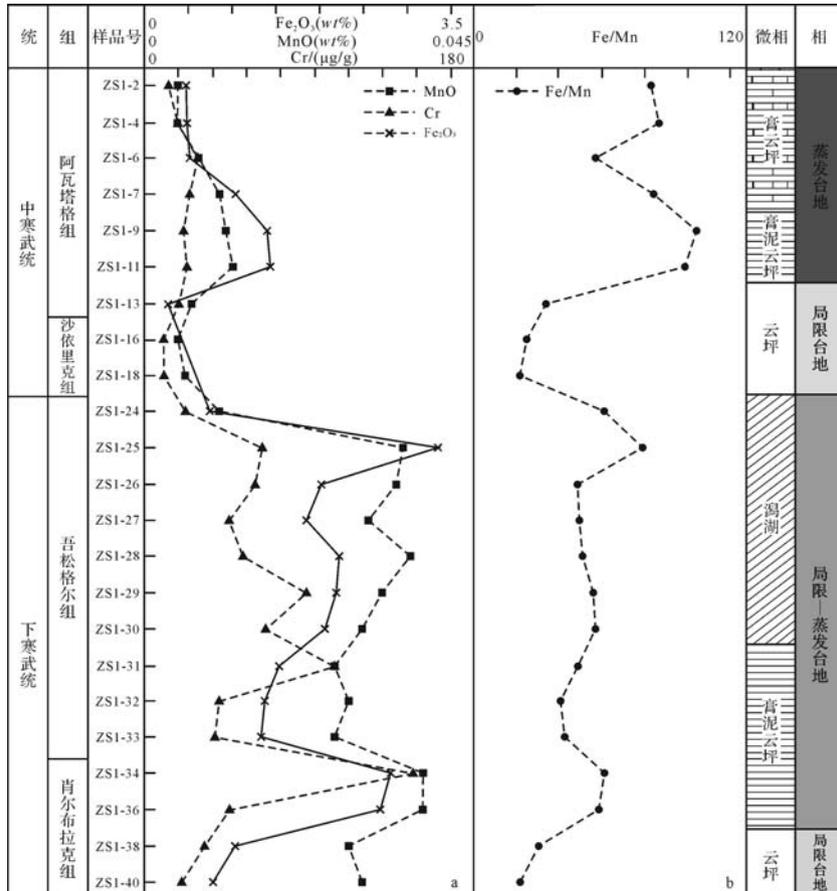


图7 ZS1井中下寒武统白云岩MnO(wt%)、Cr(×10⁻⁶)、Fe₂O₃(wt%)和Fe/Mn变化及沉积相演化

Fig.7 Variation of MnO(wt%), Cr(×10⁻⁶), Fe₂O₃(wt%), Fe/Mn ratios and sedimentary facies of Lower-Middle Cambrian carbonates in Well ZS1

高,氧同位素分馏效应减弱,白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 会不断偏负^[41-43];②成岩作用中,碳酸盐岩会与大气水、热液等流体发生水岩反应,使岩石的 $\delta^{18}\text{O}$ 不断负偏^[44]。研究表明,塔西台地寒武系—奥陶系白云岩 $\delta^{18}\text{O}$ 的范围为 -10‰ 至 -5‰ 时,表明白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 受到了埋藏成岩作用的改造,已不能反映原始的沉积环境^[24]。前人的研究也证明塔西台地阿瓦塔格组的白云岩已受到成岩作用改造,样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 较其原始值偏负^[20]。

在 ZS1 井中寒武统沙依里克组—阿瓦塔格组界限附近选取泥粉晶白云岩样品进行碳氧同位素分析。其中,沙依里克组的 10 个样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 介于 -2.5‰ ~ 0.5‰ ,平均值为 -0.25‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围为 -6.4‰ ~ -5.8‰ ,平均值为 -6.18‰ 。阿瓦塔格组 21 个样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 范围为 -1.2‰ 至 2.6‰ ,平均值为 0.8‰ ,较沙依里克组明显偏正,但二者的变化幅度大致相同; $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围为 -8.1‰ ~ -4.9‰ ,平均值为 -6.36‰ ,较沙依里克组稍偏负,变化幅度则远大于沙依里克组,有 6 个样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值小于 -7‰ (图 8)。结合前人研究^[20,24-45],ZS1 井中寒武统尤其是阿瓦塔格组白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 特征很可能已部分被改造,可能无法反映其沉积环境的特征。

图 8 显示 ZS1 井中寒武统白云岩样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 之间并不存在线性关系 ($R^2 = 0.023$),且样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 多在 0 附近,大多落在 -2‰ ~ 2‰ 区间内,沙依里克组和阿瓦塔格组 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化幅度也大致相当。这些证据显示 ZS1 井中寒武统碳酸盐岩有较大可能保留了原始沉积的碳同位素特征。自下部的沙依里克

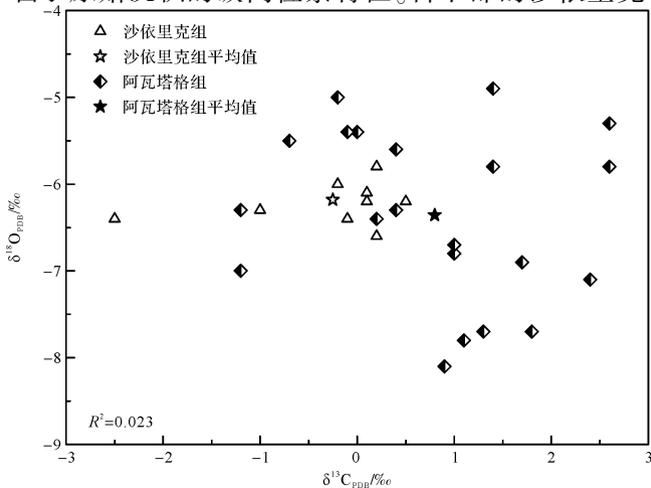


图 8 ZS1 井中寒武统白云岩 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}(\text{‰})$ - $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}(\text{‰})$ 散点图
Fig.8 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}(\text{‰})$ - $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}(\text{‰})$ relations of Middle Cambrian carbonates in Well ZS1

组到上部的阿瓦塔格组, $\delta^{13}\text{C}$ 表现出总体不断偏正的趋势(图 9),可能指示了从沙依里克组到阿瓦塔格组水体局限程度不断增加,水体可能更为温暖和富营养化(盐度较高),微生物呼吸作用也更加强烈,导致有机碳大量埋藏,沉积环境水体的 $\delta^{13}\text{C}$ 不断偏正,同时期沉积的碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 也不断偏正。

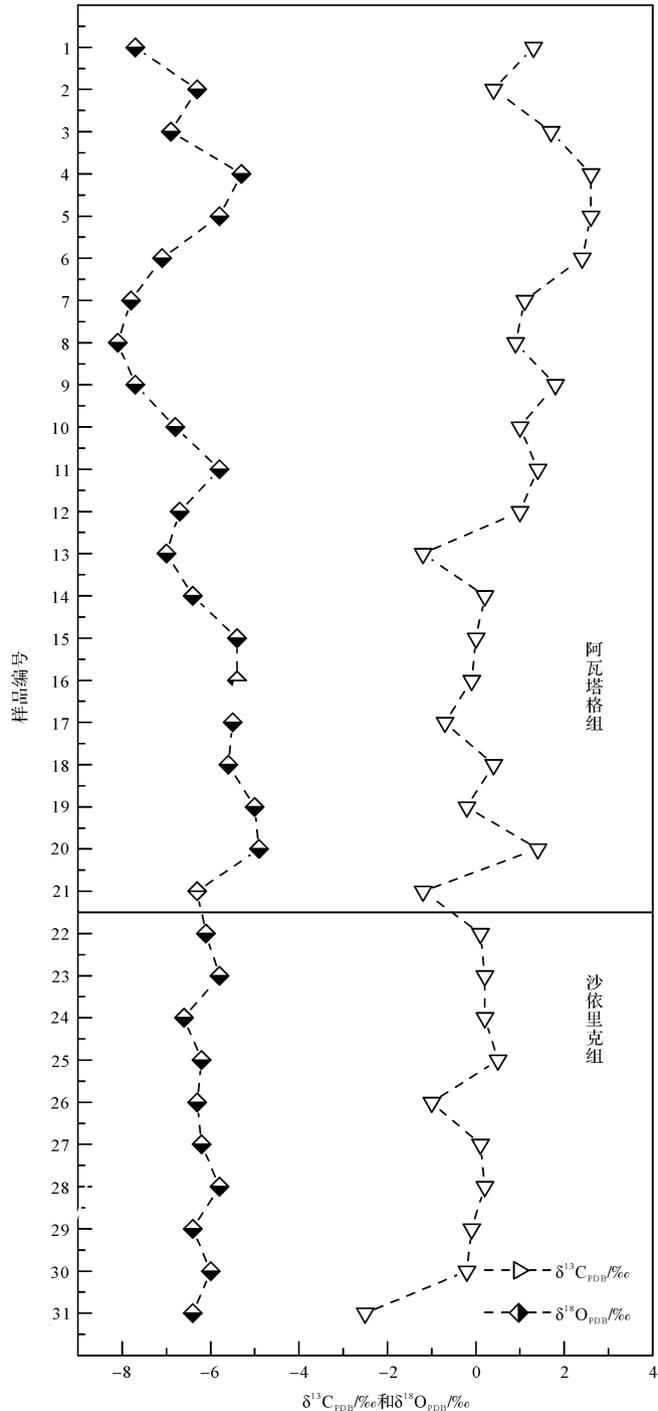


图 9 ZS1 井中寒武统白云岩 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}(\text{‰})$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}(\text{‰})$ 曲线
Fig.9 Stable carbon and oxygen isotope trends of Middle Cambrian carbonates in Well ZS1

4.2.4 陆地对沉积环境的影响

碳酸盐岩以富 Ca、Mg、Sr、Ba、Mn, 贫 Si、Al、K 为特征, 而陆源碎屑具有富 Si、Al、K 的特点, 因此碳酸盐岩中 Si、Al 和 K 的含量反映了沉积物中陆源物质的含量变化, 也在一定程度上反映相邻陆地对海相沉积环境的影响。ZS1 井中下寒武统碳酸盐岩样品的 Si、Al、K 含量受沉积微相控制明显, 在泥质含量较高的瀉湖、膏—泥云坪等微相沉积物中含量较高(图 10), 说明在考虑陆地对于海相沉积环境的影响时, 要考虑局部沉积环境(沉积微相)的影响。相同沉积微相下, Si、Al 和 K 在离岸较近、相对海平面较低的沉积环境中比离岸较远、相对海平面较高的沉积环境中更富集, 例如同为膏—泥云坪微相的沉积, 阿瓦塔格组上部样品(蒸发台地相)中的 Si、Al 和 K 较肖尔

布拉克组上部和吾松格尔组样品(局限—蒸发台地相)中更为富集, 表明相邻陆地对海相沉积环境的影响程度随着相对海平面的降低和离岸距离的减小而增大。此外, 样品中 Si、Al 和 K 整体较高的含量表明在寒武纪时期, 塔西台地受邻近陆地的影响较大。

4.3 大陆的化学风化与气候变化

Nesbitt *et al.*^[46] 在研究加拿大下元古界 Huronian 超群的碎屑岩时提出: 上地壳遭受化学风化时, 长石等主要硅酸盐矿物中 Na、K、Ca 等易迁移元素会随流体大量流失; 而 Al 的性质较为稳定, 更倾向于留在风化产物中。随着化学风化作用的增强, 风化产物中主成分 Al₂O₃ 的摩尔分数将不断增大。CIA (chemical index of alteration, 化学蚀变指数) 作为一个反映碎屑沉积物源区风化程度的指标被提出:

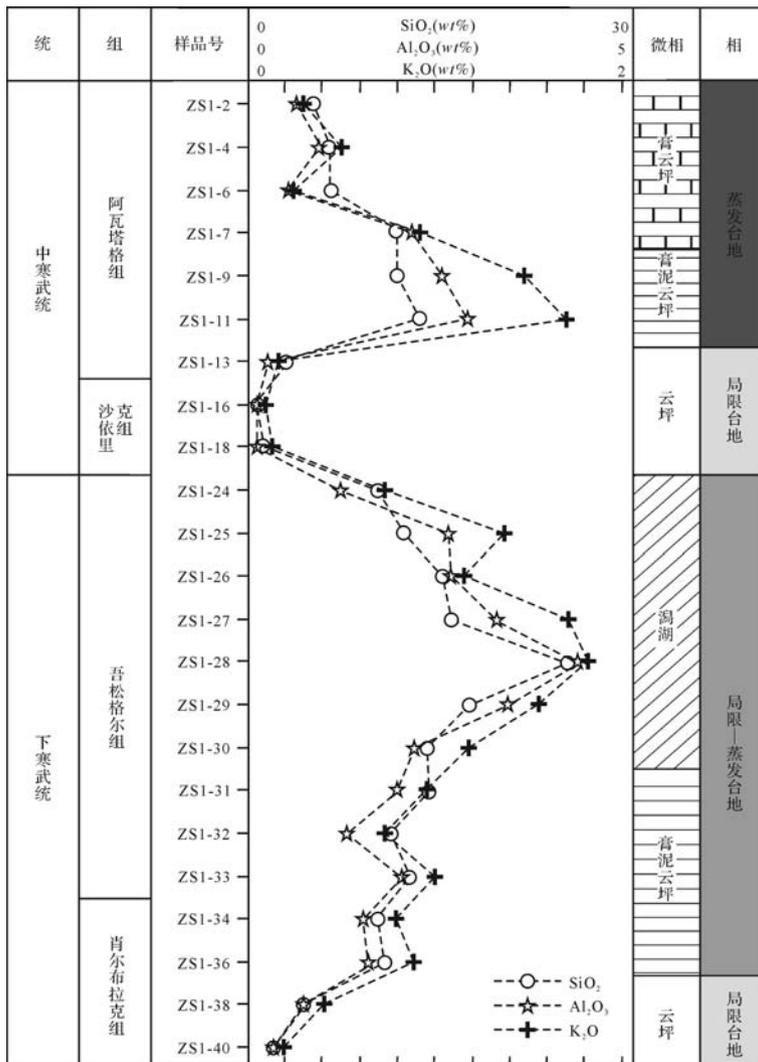


图 10 ZS1 井中下寒武统白云岩 SiO₂(wt%)、Al₂O₃(wt%) 和 K₂O(wt%) 的变化及沉积相演化

Fig.10 Viriation of SiO₂(wt%), Al₂O₃(wt%), K₂O(wt%) and sedimentary facies of Lower-Middle Cambrian carbonates in Well ZS1

$$CIA = [m(\text{Al}_2\text{O}_3)/m(\text{Al}_2\text{O}_3) + m(\text{CaO}^*) + m(\text{Na}_2\text{O}) + m(\text{K}_2\text{O})] \times 100$$

式中, m 为各种氧化物在陆源碎屑沉积物中所占的摩尔分数, CaO^* 指陆源硅酸盐碎屑中的 CaO , 即全岩的 CaO 扣除掉海水中化学沉积的 CaO 后剩余的 CaO 所占的摩尔分数。CIA 是一个无量纲的数值, CIA 越高, 指示沉积物源区所经受的化学风化程度越高^[46-48], 并可根据大陆的 化学风化背景间接指示古气候: CIA 值介于 50~65, 反映寒冷、干燥的气候条件下低等的化学风化程度; CIA 值介于 65~85, 反映温暖、湿润条件下中等的化学风化程度; CIA 值介于 85~100, 反映炎热、潮湿的热带亚热带条件下的强烈的化学风化程度^[47]。地球上一些反映典型气候的现代沉积物的 CIA 值大致如图 11 所示。

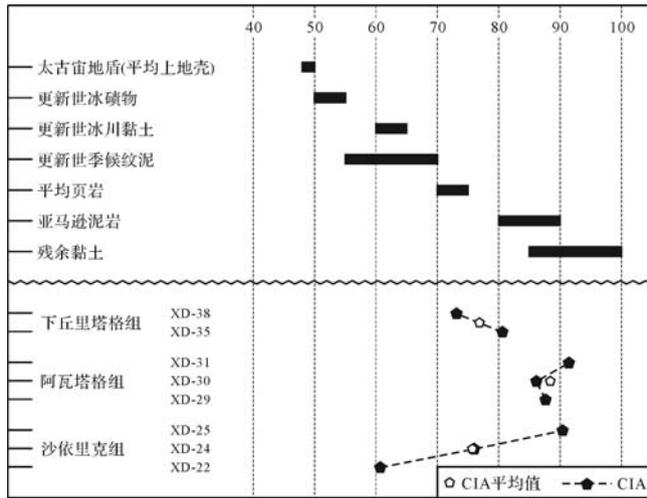


图 11 肖尔布拉克东沟中上寒武统碳酸盐岩酸不溶物及部分反映典型气候的现代沉积物的 CIA 值

Fig.11 Values of CIA for Middle-Upper Cambrian carbonates and various other rocks and sediments reflecting typical climates

海相沉积的碳酸盐岩一般含有 5% 以内的陆源碎屑。这些陆源碎屑的物源通常为沉积环境周围的陆地, 其 CIA 值代表了沉积时沉积环境附近陆地的化学风化强度, 而化学风化强度主要受气候控制, 因此 CIA 值的变化也间接指示区域气候的特征。古老地层所经历的成岩作用乃至更深埋藏导致的中低级变质作用对于 CIA 的影响很小^[46], 为利用 CIA 研究深时 (Deep Time) 气候变化提供了可能。碳酸盐岩台地中沉积的陆源碎屑普遍为经长距离搬运的细粒沉积物 (粒度普遍小于 0.1 mm), 以黏土矿物和石英为主, 其物源区主要为台地附近暴露并接受剥蚀的陆地。因此, 碳酸盐岩酸不溶物的 CIA 值往往反映了

台地所在区域内陆地的整体化学风化强度。

图 11 为肖尔布拉克东沟剖面中上寒武统白云岩酸不溶物及部分反映典型气候的现代沉积物的 CIA 值。中寒武统沙依里克组和上寒武统下丘里塔格组 CIA 的平均值分别为 75.71 和 76.86, 反映了中等程度的源区化学风化程度, 间接指示温暖湿润的气候特征, 中寒武统阿瓦塔格组 CIA 的平均值为 88.4, 指示强烈的源区化学风化, 说明阿瓦塔格期气候具有炎热潮湿的特点。表明与中寒武世早期 (沙依里克期) 相比, 中寒武世晚期 (阿瓦塔格期) 塔西台地所在区域的化学风化强度更大, 气候可能也更为炎热极端, 晚寒武世 (下丘里塔格期) 化学风化强度有所减弱, 中寒武世晚期的炎热、极端气候也变的相对温和。酸不溶物所反映的陆地化学风化及气候演化与沉积学、全岩地球化学反映的海相沉积环境的演化相匹配, 表明中晚寒武世塔西台地所在区域的海洋和陆地间存在着高度的协同演化。

4.4 海陆演化的关系和控制因素

综合沉积相演化序列, ZS1 井碳酸盐岩 Sr/Ba 反映的沉积水体古盐度变化, Fe/Mn 指示离岸距离及相对海平面变化, C 同位素反映的沉积环境演变以及酸不溶物 CIA 代表的大陆化学风化和气候的演化序列, 可总结塔西台地寒武纪的沉积相、海相沉积环境、大陆化学风化及气候演化序列如下 (图 12): ①早寒武世中期 (肖尔布拉克期) 在早寒武世早期 (玉尔吐斯期) 陆棚相沉积的基础上发生海退, 发育局限台地相沉积, Sr/Ba 反映的海水古盐度较低, Fe/Mn 反映沉积环境离岸较远, 相对海平面处于较高位置, 陆源碎屑的注入相对较少, 对海相沉积环境的影响较小; ②早寒武世晚期 (吾松格期) 持续海退, 形成局限—蒸发台地相沉积, 沉积水体古盐度较高, 沉积环境离岸较近, 相对海平面处于较低位置, 陆源碎屑的注入相对较多, 陆地对海相沉积环境的影响较大; ③中寒武世早期 (沙依里克期) 发生海侵, 发育局限台地相沉积, 海水古盐度再次降低, 沉积环境离岸距离增大, 相对海平面较高, 陆源碎屑注入减少, 对沉积环境的影响减弱, 酸不溶物 CIA 值反应台地邻近陆地的化学风化强度中等, 区域气候温暖湿润; ④中寒武世晚期 (阿瓦塔格期) 发生寒武纪最大规模海退, 形成蒸发台地相沉积, 台地内海水古盐度为寒武纪最高, 沉积环境离岸最近, 相对海平面最低, 这一时期较沙依里克期生物活动更为强烈, 有机质大量埋藏, 沉积物中陆源物质含量最高, 陆地对于海洋的影响最

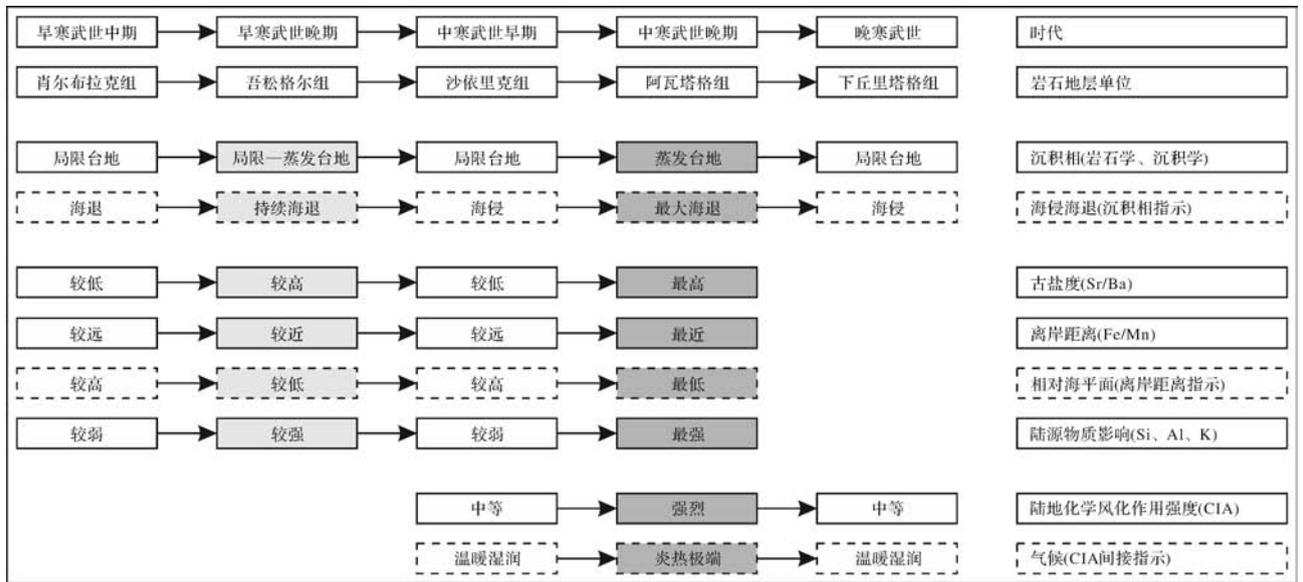


图 12 寒武纪塔西台地海洋—陆地—气候演化的协同性

Fig.12 Ocean-land-climate coupling in the western Tarim area during Cambrian

大,台地邻近陆地经历强烈的化学风化,区域气候具有炎热、极端、并可能潮湿的特征;⑤晚寒武世(下丘里塔格期)大规模持续海侵,形成局限台地—开阔台地相沉积,沉积环境可能具有较低的水体盐度、较远的离岸距离、较低的相对海平面和较弱的陆源影响,台地邻近陆地经历中等强度的化学风化作用,气候温暖湿润,与中寒武世早期(沙依里克期)相当。总体而言,寒武纪时期,塔西台地的沉积同时受海洋和陆地的影响,塔西台地所在区域的海洋和陆地的环境演化存在高度的耦合性,海洋—陆地—气候变化存在协同关系。

肖尔布拉克东沟中上寒武统白云岩样品酸不溶物的 CIA 值多数(除沙依里克组下部的一个样品外)处于 73~91 的区间内(图 11)。其中,中寒武统沙依里克组和上寒武统下丘里塔格组样品的 CIA 值介于平均页岩和亚热带地区沉积的亚马逊泥岩之间,表明中寒武世早期和晚寒武世塔里木地块所在区域的气候特征类似于现今地球的亚热带—温带气候带;而中寒武统阿瓦塔格组样品的 CIA 值则介于亚马逊泥岩和残留黏土之间,表明中寒武世晚期(阿瓦塔格期)塔里木地块的气候特征类似于现今地球的亚热带—热带气候带。本研究中样品整体较高的 CIA 值表明中晚寒武世塔里木地块整体处于较低纬度地区,与古板块位置重建的结果相符合^[32]。而从沙依里克组到阿瓦塔格组 CIA 值升高,至下丘里塔格组 CIA 值又降低,有两种可能的解释:①板块运动。塔里木地块

在中寒武世由温带—亚热带地区漂移到更低纬度的亚热带—热带地区带,在晚寒武世又重新迁移到温带—亚热带地区;②塔里木地块在中晚寒武世所经历的气候演变可能不是板块迁移所导致的,而是受宏观气候变化的影响。

对于前一种解释,以目前地球的气候带为参考,从温带—亚热带地区到亚热带—热带地区要跨越的纬度大致为 15°,若塔西台地中上寒武统所记录的气候变化是由于板块运动所导致的,则塔里木地块在中晚寒武世要经历较低纬度—低纬度—较低纬度的迁移过程,大致跨越 30°的纬度范围。已有的研究中晚寒武世期间塔里木地块并未发生如此大的迁移^[31-32];再者,以当前地球上板块运动速率大致为 2~8 cm·yr⁻¹^[49]计算,若板块垂直于纬线迁移,则跨越 30°的纬度范围所需要的时间大致为 175~50 Ma,远远大于中晚寒武世的时间范围(~22 Ma),即使寒武纪的洋壳扩张速率比现在略高^[50],要使板块在中晚寒武世跨越如此大的纬度范围,且其迁移方向发生中纬度—低纬度—中纬度的逆向折返的可能性仍然很小。因此,宏观气候的变化成为可能性更大的因素,与阿瓦塔格组大致同时期发育的华南中寒武统覃家庙群上部发育蒸发环境下形成的红层沉积^[51],而同时期华北地区张夏组也以鲕粒灰岩的大量发育标志着该时期是整个中晚寒武世华北地台相对海平面最低的时期^[52],表明中晚寒武世塔西台地的演化可能主要受全球气候的宏观变化控制。结合塔西台地

寒武纪整体较为稳定的拉张构造背景^[11,15-16],寒武纪塔西台地所处区域海洋及陆地较长周期的演化可能主要受宏观气候变化和海平面升降的控制,具体表现为相对海平面变化导致的海相沉积环境水体盐度、离岸距离的变化,以及气候控制的陆地化学风化强度的演化,且二者具有高度耦合的特征。

5 结论

通过岩石学、沉积学和地球化学手段,研究塔西台地寒武系的沉积环境特征及其演化,并与邻近陆地的化学风化背景和气候变化相结合,探讨海洋—陆地—气候演化的联系与机理,主要获得以下认识:

(1) 利用地球化学手段研究碳酸盐岩的沉积环境,首先需要评估地球化学数据的原始性:CaO-MgO关系落在沉积线附近、具有高Ba低Mn特征的泥粉晶白云岩通常保留了原始的地球化学特征。与单个元素的含量和O同位素相比,元素比值和C同位素更易排除干扰,反映沉积相演化和相对海平面升降的信息。碳酸盐岩中的非碳酸盐组分则可用以指示邻近陆地的化学风化背景和气候特征。

(2) 结合沉积相分析、Sr/Ba、Fe/Mn、Si-Al-K含量、C同位素特征和酸不溶物地球化学研究,寒武纪塔西台地发育局限台地、局限台地或蒸发台地沉积。相对海平面较高时发育局限台地,沉积环境以离岸较远、水体盐度较低、陆源影响较弱为特征,台地邻近陆地化学风化强度适中,气候温暖湿润;相对海平面较低时发育蒸发台地,沉积环境具有离岸较近、水体盐度较高、陆源影响较高的特征,邻近陆地化学风化作用较强,气候炎热极端。相对海平面适中时则发育局限—蒸发台地,沉积环境、邻近陆地和气候特征介于上述两者之间。

(3) 塔西台地寒武系沉积同时受海洋和陆地的影响,海相沉积环境和邻近陆地的演化存在高度的一致性,台地较长周期的演化主要受宏观气候变化及全球相对海平面升降控制,具体表现在相对海平面升降控制了海相沉积环境的变化,气候变化则导致陆地化学风化背景的变化。寒武纪时期,塔西台地所处区域的海洋—陆地—气候变化具有高度耦合的特征。

参考文献 (References)

- 1 Tucker M E, Wright V P. Carbonate Sedimentology [M]. Oxford: Blackwell Science Ltd, 1990: 101-226.
- 2 Rubey W W. Geologic history of sea water—an attempt to state the problem [J]. Geological Society of America Bulletin, 1951, 62(9): 1111-1148.
- 3 Hardie L A. Secular variation in seawater chemistry: an explanation for the coupled secular variation in the mineralogies of marine limestones and potash evaporites over the past 600 m.y. [J]. Geology, 1996, 24(3): 279-283.
- 4 颜佳新,伍明. 显生宙海水成分、碳酸盐沉积和生物演化系统研究进展 [J]. 地质科技情报, 2006, 25(3): 1-7. [Yan Jiaxin, Wu Ming. Synchronized oscillations in Phanerozoic chemical composition of seawater, carbonate sedimentation and biotic evolution: progresses and prospects [J]. Geological Science and Technology Information, 2006, 25(3): 1-7.]
- 5 Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P, et al. A Neoproterozoic snowball earth [J]. Science, 1998, 281(5381): 1342-1346.
- 6 Corkeron M. 'Cap carbonates' and Neoproterozoic glacial successions from the Kimberley region, north-west Australia [J]. Sedimentology, 2007, 54(4): 871-903.
- 7 Shen Bing, Xiao Shuhai, Bao Huiming, et al. Carbon, sulfur, and oxygen isotope evidence for a strong depth gradient and oceanic oxidation after the Ediacaran Hankschough glaciation [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2011, 75(5): 1357-1373.
- 8 Knoll A H, Hayes J M, Kaufman A J, et al. Secular variation in carbon isotope ratios from upper Proterozoic successions of Svalbard and east Greenland [J]. Nature, 1986, 321(6073): 832-838.
- 9 Schrag D P, Higgins J A, Macdonald F A, et al. Authigenic carbonate and the history of the global carbon cycle [J]. Science, 2013, 339(6119): 540-543.
- 10 王世杰,季宏兵,欧阳自远,等. 碳酸盐岩风化成土作用的初步研究 [J]. 中国科学(D辑), 1999, 29(5): 441-449. [Wang Shijie, Ji Hongbing, Ouyang Ziyuan, et al. Preliminary study on weathering and pedogenesis of carbonate rock [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 1999, 29(5): 441-449.]
- 11 贾承造. 塔里木盆地构造特征与油气聚集规律 [J]. 新疆石油地质, 1999, 20(3): 177-183. [Jia Chengzao. Structural characteristics and oil/gas accumulative regularity in Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1999, 20(3): 177-183.]
- 12 赵宗举,罗家洪,张运波,等. 塔里木盆地寒武纪层序岩相古地理 [J]. 石油学报, 2011, 32(6): 937-948. [Zhao Zongju, Luo Jiahong, Zhang Yunbo, et al. Lithofacies paleogeography of Cambrian sequences in the Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(6): 937-948.]
- 13 Zhang Wei, Guan Ping, Jian Xing, et al. *In situ* geochemistry of Lower Paleozoic dolomites in the northwestern Tarim Basin: implications for the nature, origin, and evolution of diagenetic fluids [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2014, 15(7): 2744-2764.
- 14 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 348-364. [Jia Chengzao. Tectonic Characteristics and Petroleum, Tarim Basin, China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 348-364.]
- 15 何登发,贾承造,李德生,等. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(1): 64-77. [He Dengfa, Jia

- Chengzao, Li Desheng, et al. Formation and evolution of polycyclic superimposed Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(1): 64-77.]
- 16 许志琴,李思田,张建新,等. 塔里木地块与古亚洲/特提斯构造体系的对接[J]. *岩石学报*, 2011, 27(1): 1-22. [Xu Zhiqin, Li Sitian, Zhang Jianxin, et al. Paleo-Asian and Tethyan tectonic systems with docking the Tarim block[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(1): 1-22.]
- 17 顾家裕. 塔里木盆地沉积层序特征及其演化[M]. 北京:石油工业出版社, 1996:1-361. [Gu Jiayu. *Sedimentary Sequence Characteristics and Evolution of the Tarim Basin*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996: 1-361.]
- 18 刘伟,张光亚,潘文庆,等. 塔里木地区寒武纪岩相古地理及沉积演化[J]. *古地理学报*, 2011, 13(5): 529-538. [Liu Wei, Zhang Guangya, Pan Wenqing, et al. Lithofacies palaeogeography and sedimentary evolution of the Cambrian in Tarim area[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2011, 13(5): 529-538.]
- 19 于炳松,陈建强,林畅松. 塔里木地台北部寒武纪—奥陶纪层序地层及其与扬子地台和华北地台的对比[J]. *中国科学(D辑):地球科学*, 2001, 31(1): 17-26. [Yu Bingsong, Chen Jianqiang, Lin Changsong. Cambrian-Ordovician sequence stratigraphy on the northern Tarim platform and its correlation and Yangtz platform and North China platform[J]. *Science China (Series D): Earth Sciences*, 2001, 31(1): 17-26.]
- 20 赵宗举,张运波,潘懋,等. 塔里木盆地寒武系层序地层格架[J]. *地质论评*, 2010, 56(5): 609-620. [Zhao Zongju, Zhang Yunbo, Pan Mao, et al. Cambrian sequence stratigraphic framework in Tarim Basin[J]. *Geological Review*, 2010, 56(5): 609-620.]
- 21 冯增昭,鲍志东,吴茂炳,等. 塔里木地区寒武纪岩相古地理[J]. *古地理学报*, 2006, 8(4): 427-439. [Feng Zengzhao, Bao Zhidong, Wu Maobing, et al. Lithofacies palaeogeography of the Cambrian in Tarim area[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2006, 8(4): 427-439.]
- 22 陈永权,周新源,杨文静. 塔里木盆地寒武系白云岩的主要成因类型及其储层评价[J]. *海相油气地质*, 2009, 14(4): 10-17. [Chen Yongquan, Zhou Xinyuan, Yang Wenjing. Genesis of Cambrian dolostone and the reservoir evaluation in Tarim Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2009, 14(4): 10-17.]
- 23 陈永权,周新源,杨海军. 塔里木盆地塔中地区上寒武统三种截面特征白云岩的岩石地球化学特征与成因研究[J]. *沉积学报*, 2010, 28(2): 209-218. [Chen Yongquan, Zhou Xinyuan, Yang Haijun. Geochemical research and genesis of dolostones with different crystal characteristics occurring in the Upper Cambrian, central area of Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(2): 209-218.]
- 24 郑剑锋,沈安江,刘永福,等. 塔里木盆地寒武—奥陶系白云岩成因及分布规律[J]. *新疆石油地质*, 2011, 32(6): 600-604. [Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Liu Yongfu, et al. Genesis and distribution of the Cambro-Ordovician dolomite in Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2011, 32(6): 600-604.]
- 25 何宏,彭苏萍,邵龙义. 巴楚寒武—奥陶系碳酸盐岩微量元素及沉积环境[J]. *新疆石油地质*, 2004, 25(6): 631-633. [He Hong, Peng Suping, Shao Longyi. Trace elements and sedimentary settings of Cambrian-Ordovician carbonates in Bachu area, Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2004, 25(6): 631-633.]
- 26 张水昌, Wang Ruiliang, 金之钧, 等. 塔里木盆地寒武纪—奥陶纪优质烃源岩沉积与古环境变化的关系: 碳氧同位素新证据[J]. *地质学报*, 2006, 80(3): 459-466. [Zhang Shuichang, Wang Ruiliang, Jin Zhijun, et al. The relationship between the Cambrian-Ordovician high-TOC source rock development and paleoenvironment variations in the Tarim Basin, western China: carbon and oxygen isotope evidence[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(3): 459-466.]
- 27 姚春彦, 马东升, 丁海峰, 等. 新疆阿克苏地区早寒武世碳酸盐岩沉积环境: 微量元素和碳同位素证据[J]. *地球化学*, 2011, 40(1): 63-71. [Yao Chunyan, Ma Dongsheng, Ding Haifeng, et al. Reconstruction of the Early Cambrian carbonate sedimentary environment in Akesu area of Xinjiang, China: evidence from trace elements and carbon isotope excursion[J]. *Geochimica*, 2011, 40(1): 63-71.]
- 28 鲍志东, 朱井泉, 江茂生, 等. 海平面升降中的元素地球化学响应——以塔中地区奥陶纪为例[J]. *沉积学报*, 1998, 16(4): 32-36. [Bao Zhidong, Zhu Jingquan, Jiang Maosheng, et al. Isotope and trace element evolution; response to sea-level fluctuation—an example of Ordovician in the middle Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(4): 32-36.]
- 29 鲍志东, 金之钧, 孙龙德, 等. 塔里木地区早古生代海平面波动特征: 来自地球化学及岩溶的证据[J]. *地质学报*, 2006, 80(3): 366-373. [Bao Zhidong, Jin Zhijun, Sun Longde, et al. Sea-level fluctuation of the Tarim area in the Early Paleozoic: response from geochemistry and karst[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(3): 366-373.]
- 30 高志前, 樊太亮, 李岩, 等. 塔里木盆地寒武—奥陶纪海平面升降变化规律研究[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2006, 36(4): 549-556. [Gao Zhiqian, Fan Tailiang, Li Yan, et al. Study on eustatic sea-level change rule in Cambrian-Ordovician in Tarim Basin[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2006, 36(4): 549-556.]
- 31 朱日祥, 杨振宇, 吴汉宁, 等. 中国主要地块显生宙古地磁极移曲线与地块运动[J]. *中国科学(D辑)*, 1998, 28(增刊1): 1-16. [Zhu Rixiang, Yang Zhengyu, Wu Hanning, et al. Paleomagnetic constraints on the tectonic history of the major blocks of China during the Phanerozoic[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 1998, 28(Suppl.1): 1-16.]
- 32 侯方辉, 张训华, 温珍河, 等. 古生代以来中国主要块体活动古地理重建及演化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(6): 9-26. [Hou Fanghui, Zhang Xunhua, Wen Zhenhe, et al. Paleogeographic reconstruction and tectonic evolution of major blocks in China since Paleozoic[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(6): 9-26.]
- 33 中华人民共和国国家石油和化学工业局. SY/T 5516-2000 碳酸盐岩化学分析方法[S]. 北京:石油工业出版社, 2001:1-11. [The National Petroleum and Chemical Industry Bureau of the people's Republic of China. SY/T 5516-2000 Chemical analysis method for car-

- bonate rocks[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001: 1-11.]
- 34 周进高,房超,季汉成,等. 四川盆地寒武统龙王庙组颗粒滩发育规律[J]. 天然气工业,2014,34(8):27-36. [Zhou Jingao, Fang Chao, Ji Hancheng, et al. A development rule of Lower Cambrian Longwangmiao grain beaches in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(8): 27-36.]
- 35 Warren J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations[J]. Earth-Science Reviews, 2000, 52(1/2/3): 1-81.
- 36 陈永权,周新源,赵葵东,等. 塔里木盆地中寒武统泥晶白云岩红层的地球化学特征与成因探讨[J]. 高校地质学报,2008,14(4): 583-592. [Chen Yongquan, Zhou Xinyuan, Zhao Kuidong, et al. Geochemical research on Middle Cambrian red dolostones in Tarim Basin: implications for dolostone genesis[J]. Geological Journal of China Universities, 2008, 14(4): 583-592.]
- 37 Zhu Dongya, Jin Zhijun, Hu Wenxuan. Hydrothermal recrystallization of the Lower Ordovician dolomite and its significance to reservoir in northern Tarim Basin[J]. Science China Earth Sciences, 2010, 53(3): 368-381.
- 38 赵闯,于炳松,张聪,等. 塔中地区与热液有关白云岩的形成机理探讨[J]. 岩石矿物学杂志,2012,31(2):164-172. [Zhao Chuang, Yu Bingsong, Zhang Cong, et al. A discussion on the formation mechanism of dolomite associated with hydrothermal solution in Tazhong area[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2012, 31(2): 164-172.]
- 39 孙立广,谢周清,赵俊琳. 南极阿德雷岛湖泊沉积物 Sr/Ba 与 B/Ga 比值特征[J]. 海洋地质与第四纪地质,2000,20(4):43-46. [Sun Liguang, Xie Zhouqing, Zhao Junlin. The characteristics of Sr/Ba and B/Ga ratios in lake sediments on the Ardley peninsula, Maritime Antarctic[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2000, 20(4): 43-46.]
- 40 胡明毅. 塔北柯坪奥陶系碳酸盐岩地球化学特征及环境意义[J]. 石油与天然气地质,1994,15(2):158-163. [Hu Mingyi. Geochemical characters and environmental significance of Ordovician carbonate rocks in Keping area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 1994, 15(2): 158-163.]
- 41 O'neil J R, Clayton R N, Mayeda T K. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates[J]. The Journal of Chemical Physics, 1969, 51(12): 5547.
- 42 Horita J. Oxygen and carbon isotope fractionation in the system dolomite-water-CO₂ to elevated temperatures[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2014, 129: 111-124.
- 43 Mathieu J, Kontak D J, Turner E C, et al. Geochemistry of Phanerozoic diagenesis on Victoria Island, NWT, Canada[J]. Chemical Geology, 2015, 415: 47-69.
- 44 Garzione C N, Dettman D L, Horton B K. Carbonate oxygen isotope paleoaltimetry: evaluating the effect of diagenesis on paleoelevation estimates for the Tibetan Plateau[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2004, 212(1/2): 119-140.
- 45 陈永权,周新源. 塔里木盆地中寒武统—下奥陶统泥晶灰岩地球化学与古海洋学[J]. 海洋地质与第四纪地质,2009,29(1):47-52. [Chen Yongquan, Zhou Xinyuan. Geochemical characteristics of middle Cambrian-early Ordovician limestone and paleo-ocean reconstruction based on $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and rare earth elements, Tarim Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29(1): 47-52.]
- 46 Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 1982, 299(5885): 715-717.
- 47 冯连君,储雪雷,张启锐,等. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用[J]. 地学前缘,2003,10(4):539-544. [Feng Lianjun, Chu Xuelei, Zhang Qirui, et al. CIA (chemical index of alteration) and its applications in the Neoproterozoic clastic rocks[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(4): 539-544.]
- 48 Jian Xing, Guan Ping, Zhang Wei, et al. Geochemistry of Mesozoic and Cenozoic sediments in the northern Qaidam basin, northeastern Tibetan Plateau: Implications for provenance and weathering[J]. Chemical Geology, 2013, 360-361: 74-88.
- 49 Uyeda S. The New View of the Earth[M]. San Francisco: Freeman, 1978: 42-92.
- 50 Gaffin S. Ridge volume dependence on seafloor generation rate and inversion using long term sealevel change[J]. American Journal of Science, 1987, 287(6): 596-611.
- 51 张秀莲,于德龙,王贤. 湖北宜昌地区寒武系碳酸盐岩岩石学特征及沉积环境[J]. 古地理论,2003,5(2):152-161. [Zhang Xiulian, Yu Delong, Wang Xian. The petrographic characteristics and sedimentary environments of carbonate rocks of the Cambrian in Yichang area, Hubei province[J]. Journal of Palaeogeography, 2003, 5(2): 152-161.]
- 52 朱传庆,罗杨,杨帅,等. 北京西山寒武系层序地层[J]. 中国地质,2009,36(1):120-130. [Zhu Chuanqing, Luo Yang, Yang Shuai, et al. Sequence stratigraphy of Cambrian in Western Hills, Beijing[J]. Geology in China, 2009, 36(1): 120-130.]

Evolution of Cambrian Sedimentary Environment and Ocean-Land Coupling of the Western Tarim Carbonate Platform

LIU PeiXian¹ GUAN Ping¹ FENG Fan¹ JIA WenBo¹ ZHANG Wei¹
DENG ShiBiao¹ JIN YiQiu²

(1. MOE Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Beijing 100083, China)

Abstract: As the transition zone between terrestrial and marine environment, carbonate platform sediments record information both from ocean and land. Some geochemical research are carried on Cambrian carbonates and their acid-insoluble residua based on sedimentary facies analysis, focused on development of sedimentary environment, change of paleosalinity, sea level fluctuations, evolution of terrestrial chemical weathering intensity and climate change. Lithological and sedimentological research show that sedimentary facies of the Western Tarim Carbonate Platform in Cambrian was mainly restricted platform, restricted-evaporite platform or evaporite platform. Geochemical characteristics of carbonates is usually generated by sedimentation and reformed by diagenesis. The elemental composition and O isotope of our samples are respectively affected by sedimentary micro-facies and water-rock interaction, only Sr/Ba, Fe/Mn and C isotope of primary or penecontemporaneous dolomite can be used to indicate paleosalinity, offshore distance and other characteristics of sedimentary environment. Evolution of terrestrial chemical weathering intensity and climate change can be reflected by CIA (chemical index of alteration) of the carbonates' acid-insoluble residua. In Cambrian, restricted platform was developed in western Tarim when the RSL (relative sea level) is at high position, sedimentary environment was characterized by relatively low salinity, far offshore distance and weak biological activity, with moderate terrestrial chemical weathering and mild climate. On the contrary, when the RSL is relatively low, evaporite platform is developed and with sedimentary environment characterized by high salinity, near offshore distance and strong biological activity, the terrestrial chemical weathering is intense, indicating hot or possibly humid climate. The situation when restricted-evaporite platform developed is between the two forementioned. Relatively long-period evolution of the Western Tarim Carbonate Platform corresponding to facies' development may be controlled by global climate change and sea level fluctuations. Concretely, the evolution of marine sedimentary environment is mostly controlled by RSL change, and the change of terrestrial chemical weathering flux is mainly controlled by climate change. High consistency can be found among sedimentary facies sequences, evolution of marine sedimentary environment, change of terrestrial chemical weathering intensity, relative sea level change and climate change. Therefore, it represent a close ocean-land-climate coupling of the western Tarim Carbonate Platform in Cambrian.

Key words: western Tarim Platform; Cambrian dolomite; sedimentary environment; CIA of acid-insoluble residua; ocean-continent coupling