

# 滇黔北坳陷寒武系碳酸盐岩古海洋环境特征及地质意义

王鹏万<sup>1,2</sup> 斯春松<sup>1</sup> 张润合<sup>1,2</sup> 李娴静<sup>1,2</sup> 马立桥<sup>1,2</sup> 黄 羚<sup>1,2</sup> 徐云俊<sup>1,2</sup> 鲁慧丽<sup>1,2</sup>

(1. 中国石油杭州地质研究院 杭州 310023; 2. 中国石油天然气集团公司碳酸盐岩储层重点实验室 杭州 310023)

**摘 要** 为厘定滇黔北坳陷寒武系碳酸盐岩古海洋环境,揭示成岩流体与岩溶作用的潜在联系,并预测有利储层发育层段,基于镇雄羊场碳酸盐岩剖面实测及系统取样基础上,采用微量元素、碳氧锶同位素及铸体薄片等分析手段,地球化学与岩石学方法相结合,探讨碳酸盐岩古海洋环境及地质意义。研究结果表明:滇黔北坳陷寒武系清虚洞组—娄山关组整体为海相环境,古海洋温度处于 12.82℃~32.84℃ 之间,主体为温暖或炎热的亚热带气候。海平面具有主体震荡下降的趋势,存在 8 期海平面变化旋回,发育对应的岩相组合,其同位素演化曲线可作为地层划分依据。微量元素、同位素地球化学及岩石学特征证实娄山关组岩溶作用相对发育,成岩流体混入强氧化性低温大气水,有利储层纵向上主要分布在海平面下降旋回的高部位。

**关键词** 寒武系 碳酸盐岩 碳氧锶同位素 古海洋环境 地质意义

**第一作者简介** 王鹏万 男 1981 年出生 硕士 工程师 石油地质综合研究 E-mail: wangpw\_hz@petrochina.com.cn

**中图分类号** P534.41 P736.21 **文献标识码** A

海相碳酸盐岩作为内源沉积岩,纪录大量古温度、古降水、古盐度以及古生产力等古海洋环境要素的变迁历史<sup>[1]</sup>,而海相碳酸盐岩的稳定同位素能近似反映古海洋稳定同位素的组成<sup>[2-4]</sup>。因此,稳定碳、氧及锶同位素的元素地球化学分析,可作为示踪古海洋环境特征及演化的重要手段,能有效表征古海洋的温度、盐度与海平面相对变化<sup>[5-8]</sup>,划分对比地层、恢复沉积环境及其成岩过程<sup>[9-10]</sup>。

随着川中地区高石梯—磨溪构造整装特大型气田的发现<sup>[11]</sup>,前人对四川盆地及周缘震旦系—寒武系沉积储层、成藏及构造演化等方面展开了系统的研究<sup>[12-15]</sup>,同时也涉及到晚震旦世灯影组及下寒武统筇竹寺组黑色页岩古海洋环境的探讨<sup>[9,16-17]</sup>,但针对寒武系碳酸盐岩古海洋环境及油气地质意义的研究则相对薄弱<sup>[18]</sup>。本文试图通过微量元素及碳、氧、锶同位素变化特征,追溯与重建滇黔北坳陷寒武系碳酸盐岩沉积的古海洋环境,并尝试揭示寒武系古岩溶储层成岩流体性质,厘清古环境与储层发育的潜在联系,为评价与预测优质储层提供地质依据。

## 1 地质概况

滇黔北坳陷地理位置位于云贵川三省交界处,大

地构造位置处于四川盆地南缘,其可划分为五个次级构造带<sup>[19]</sup>(图 1)。早寒武世梅树村期至筇竹寺期,快速海侵,滇黔北坳陷堆积一套深水陆棚相的暗色泥页岩<sup>[19]</sup>,为南方海相页岩气勘探主要目的层之一<sup>[17]</sup>;早寒武世晚期沧浪铺阶,滇黔北地区逐渐过渡到浅水陆棚亚相,沉积了明心寺组及金顶山组的碎屑岩地层;早寒武世晚期龙王庙阶(清虚洞期),中上扬子区演化为统一的碳酸盐岩缓坡,主要发育泥粉晶灰岩、粉晶白云岩及颗粒灰岩等缓坡相的碳酸盐岩;中寒武世,沉积环境演化过渡到陆棚相,岩性以泥质白云岩、泥页岩及白云岩为主;中寒武世晚期—晚寒武世,沉积了一套局限台地相、以大套白云岩夹泥质白云岩为主的娄山关组<sup>[18]</sup>。滇黔北坳陷寒武系碳酸盐岩从下往上依次为清虚洞组、高台组及娄山关组(图 2)。常规油气勘探实践表明,清虚洞组与娄山关组为常规天然气勘探的主要层系<sup>[11-14]</sup>。

## 2 样品采集与测试

### 2.1 样品采集与分析

本次针对镇雄羊场剖面寒武系清虚洞组—娄山关组碳酸盐岩采样 34 件(剖面位置见图 1),选取未经蚀变的新鲜样品 22 件(剖面纵向样品位置见图

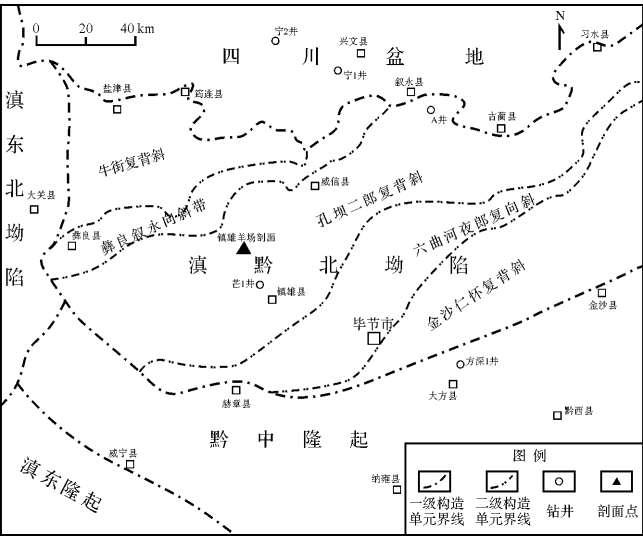


图 1 滇黔北坳陷构造区划图

Fig.1 Structure of the Dianqianbei depression

2),避开方解石脉和风化作用严重的区域,以便样品能尽量反映原始沉积环境与特征<sup>[7]</sup>。碳酸盐岩样品微量元素及碳、氧、锶同位素测试均在中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室完成。

微量元素分析采用压模法进行 X 射线荧光光谱

表 1 滇黔北坳陷羊场剖面碳酸盐岩微量元素及碳氧锶同位素分析表

Table 1 The trace element and Carbon, oxygen and strontium isotopes in the carbonates of the Cambrian in the Yangchang section of the Dianqianbei depression

序号	样品编号	层位	岩性	Mn /( $\mu\text{g/g}$ )	Sr /( $\mu\text{g/g}$ )	Mn/Sr	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ /‰	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ /‰	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	温度指数 T/℃	盐度指数 Z/‰
1	YC-3-B1	金顶山组	钙质粉砂岩	499	252.5	1.98	1.36	-8.81	0.710 850	22.50	125.70
2	YC-7-B1	清虚洞组	灰质白云岩	456.3	446.7	1.02	0.59	-10.09	0.710 207	28.52	123.49
3	YC-8-B1	清虚洞组	砂屑灰岩	844.4	73.9	11.43	-5.62	-8.83	0.713 594	22.57	111.39
4	YC-9-B1	清虚洞组	灰质白云岩	428.7	90.2	4.75	0.88	-7.59	0.717 875	17.16	125.32
5	YC-10-B1	清虚洞组	灰色灰岩	302.8	149.8	2.02	-0.69	-9.85	0.710 860	27.36	120.97
6	YC-12-B1	清虚洞组	泥晶灰岩	267.6	118.4	2.26	-1.50	-10.17		28.91	119.16
7	YC-15-B2	清虚洞组	灰色灰岩	307.6	109.1	2.82	-0.71	-10.17	0.717 947	28.88	120.77
8	YC-18-B2	清虚洞组	粉晶灰岩	348.3	75.7	4.60	-0.91	-8.77	0.714 397	22.33	121.07
9	YC-20-B1	高台组	泥晶白云岩	309	106.4	2.90	-0.29	-7.63	0.710 390	17.30	122.90
10	YC-22-B1	娄山关组	粉晶白云岩	301.6	82.1	3.67	-0.76	-7.58	0.721 084	17.12	121.96
11	YC-26-B1	娄山关组	粉晶白云岩	347	47.7	7.27	-0.26	-8.41	0.711 604	20.69	122.59
12	YC-29-B1	娄山关组	泥粉晶白云岩	316.4	68.7	4.61	-0.71	-7.67	0.722 071	17.49	122.02
13	YC-31-B1	娄山关组	泥晶白云岩	374.6	141.8	2.64	-1.32	-10.96		32.84	119.15
14	YC-35-B1	娄山关组	泥晶白云岩	331.4	56	5.92	0.00	-6.78		13.82	123.91
15	YC-37-B1	娄山关组	泥晶白云岩	300	91.7	3.27	-1.38	-9.88		27.50	119.55
16	YC-43-B2	娄山关组	细晶白云岩	370	56.1	6.60	-5.38	-9.58	0.733 585	26.04	111.50
17	YC-44-B2	娄山关组	中晶白云岩	327.8	48.8	6.72	-2.97	-9.39		25.15	116.55
18	YC-45-B1	娄山关组	砂屑白云岩	294.4	77.1	3.82	-1.58	-7.35		16.15	120.40
19	YC-46-B2	娄山关组	泥晶白云岩	274.9	61.7	4.46	-1.35	-6.84		14.08	121.14
20	YC-48-B2	娄山关组	泥晶白云岩	334	67.1	4.98	-1.93	-6.53	0.712 347	12.82	120.10
21	YC-50-B1	娄山关组	砂屑白云岩	293.9	<5.0		-1.10	-6.94	0.710 325	14.47	121.60
22	YC-51-B1	娄山关组	细晶白云岩	355.8	<5.0		-1.11	-7.43	0.709 756	16.49	121.33

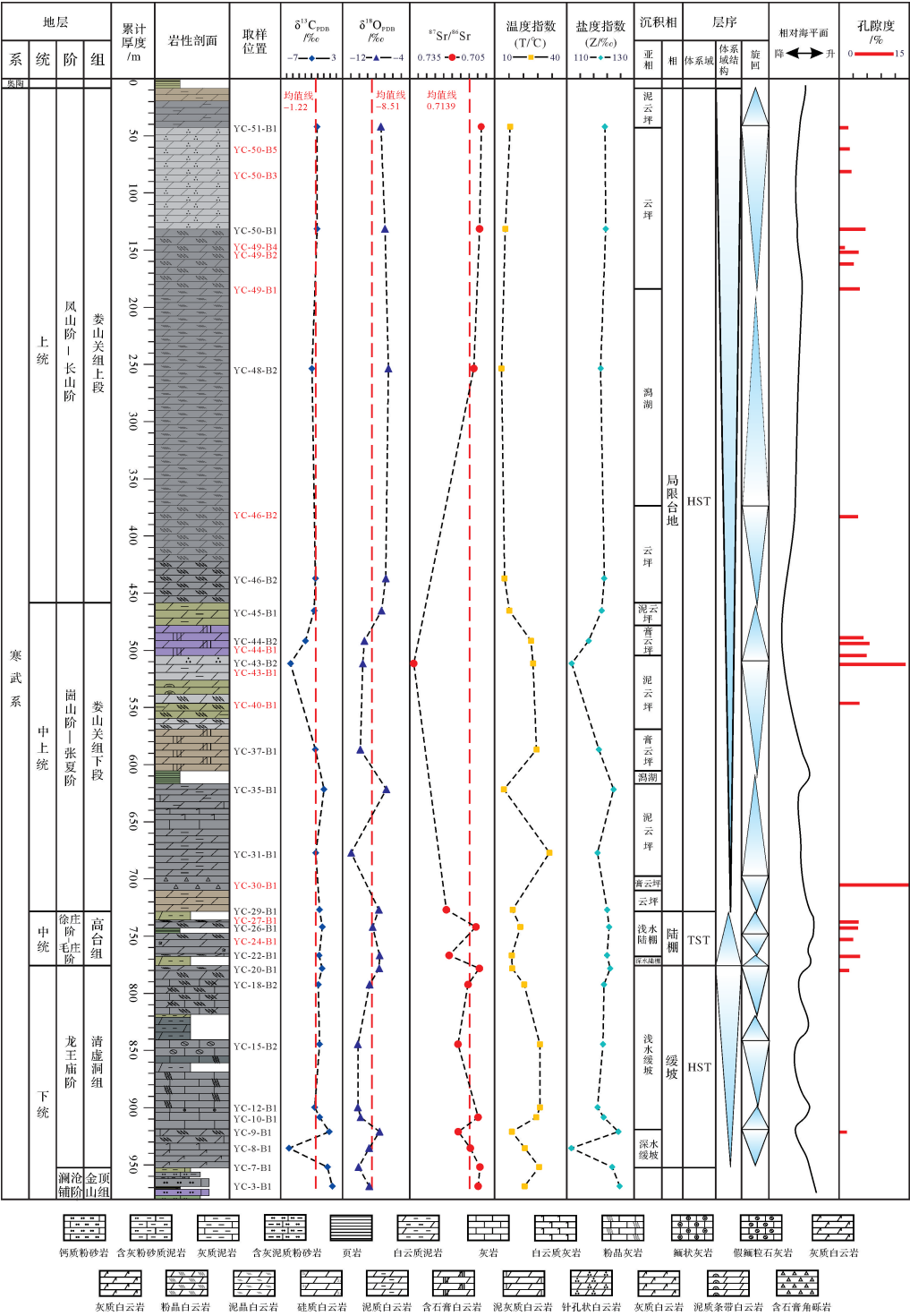


图 2 滇黔北拗陷羊场剖面同位素及海平面变化曲线图

Fig.2 Variation curves of the sea level and isotopes of the Yangchang section in the Dianqianbei depression

岩未遭受强烈的蚀变,其同位素组成可代表原始沉积记录; $Mn/Sr < 2 \sim 3$  表示样品很好地保留原始海水的同位素组成及特征<sup>[7,9]</sup>。

(2) 氧同位素特征。碳酸盐岩中  $\delta^{18}O$  值因成岩后期水岩相互作用而明显降低<sup>[7]</sup>。当  $-11.0\text{‰} < \delta^{18}O < -5.0\text{‰}$  时,指示样品受到一定蚀变作用,其值可以代表沉积物中原始碳、氧同位素组成;当  $\delta^{18}O < -11.0\text{‰}$  时,样品则成岩蚀变作用严重,其同位素值不能代表沉积物中原始的碳、氧同位素组成<sup>[20-21]</sup>。

(3) 碳、氧同位素相关性。碳酸盐岩若受到后期

成岩蚀变作用,其  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值呈正相关性关系;若  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值表现离散性特征,则反映其基本保存了原始的碳、氧同位素组成<sup>[7-8]</sup>。

镇雄羊场剖面 22 件寒武系碳酸盐岩样品中,21 件样品 Mn/Sr 比值大于 10(除 YC-8-B1 样品外),其他 Mn/Sr 比值分布在 1.02~7.27,5 个样品的 Mn/Sr 值在 2~3(表 1);22 件样品的  $\delta^{18}\text{O}$  值均大于  $-11.0\text{‰}$ (表 1),能有效反映原始地层的同位素特征;寒武系碳酸盐岩碳、氧同位素相关性较差,表现为离散特征(图 3)。通过以上分析,羊场剖面 22 件寒武系碳酸盐岩样品受成岩及后期蚀变作用的影响程度较低,基本代表了原始沉积物的碳、氧及锶同位素组成,能满足分析寒武纪古海洋环境的要求。

### 3 古海洋环境特征

#### 3.1 古海洋温度

$\delta^{18}\text{O}$  值是测定古海水温度的可靠标志<sup>[5-9]</sup>,由于寒武系碳酸盐岩时代老,成岩作用影响显著,需要对其  $\delta^{18}\text{O}$  值进行“年代效应”校正<sup>[22]</sup>。年代校正以第四纪海相碳酸盐岩的  $\delta^{18}\text{O}$  平均值即  $-1.2\text{‰}$  为标准,滇黔北坳陷镇雄羊场剖面实测  $\delta^{18}\text{O}$  平均值为  $-8.51\text{‰}$ ,二者之差即为年代校正值  $\Delta\delta^{18}\text{O} = -7.31\text{‰}$ 。故实测值与年代校正值  $\Delta\delta^{18}\text{O}$  相减,即可将实测  $\delta^{18}\text{O}$  值校正成第四纪样品的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3\text{校正}}$  值<sup>[7-9]</sup>。根据古温度计算公式:  $T = 16.9 - 4.2 \times (\delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3\text{校正}} + 0.22) + 0.13 \times (\delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3\text{校正}} + 0.22)^{2[9,23]}$ , 计算结果见表 1。

滇黔北坳陷寒武纪古海水温度在  $12.82^\circ\text{C} \sim 32.84^\circ\text{C}$  之间(表 1、图 2),主体为温暖或炎热的亚热带气候<sup>[9]</sup>。相对震旦纪,海水温度开始升高。就本次样品而言,最高与最低古海洋温度均出现在娄山关组早期。娄山关组晚期,古海洋温度最低,平均为  $15.98^\circ\text{C}$ ;清虚洞期,古海洋平均温度最高,为  $24.78^\circ\text{C}$ ;娄山关组早期,平均古海洋温度为  $22.58^\circ\text{C}$ ,而高台组平均古海洋温度为  $17.30^\circ\text{C}$ (表 1、图 2)。羊场寒武系剖面由早到晚,即清虚洞组→高台组→娄山关组下段→娄山关组上段,平均古海洋温度整体具有降低→升高→降低→升高→降低→升高→降低的变化趋势,具有 4 次古温度相对升降变化旋回。温度波动相对不大,但变化频率较高(图 2)。

#### 3.2 古海洋盐度

Keith 和 Weber 提出了利用灰岩的  $\delta^{13}\text{C}$  及  $\delta^{18}\text{O}$  值区分海相石灰岩和淡水相石灰岩,其计算公式为:  $Z = 2.048 \times (\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498 \times (\delta^{18}\text{O} + 50)$ <sup>[24]</sup>。当古盐

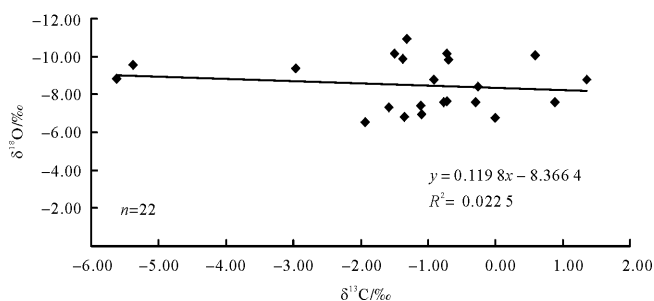


图 3 羊场剖面寒武系碳酸盐岩  $\delta^{13}\text{C}$  与  $\delta^{18}\text{O}$  值相关性散点图

Fig.3 Scatter diagram showing relationship between  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  of the Cambrian carbonates in the Yangchang section

度标准值  $Z > 120\text{‰}$  时,为海相碳酸盐岩; $Z < 120\text{‰}$  时,为淡水碳酸盐岩。整体上,羊场剖面早寒武世晚期—晚寒武世,各期的  $Z$  值变化曲线与其对应的碳同位素变化曲线变化相似(图 2),暗示  $\delta^{13}\text{C}$  相对  $\delta^{18}\text{O}$  而言,与古盐度关系更为密切<sup>[5-10]</sup>。

羊场剖面寒武系碳酸盐岩  $Z$  值为  $111.39\text{‰} \sim 125.70\text{‰}$ ,平均值为  $120.57\text{‰}$ ,大部分  $Z$  值大于  $120\text{‰}$ (表 1),表明寒武纪滇黔北坳陷整体处于陆表海的沉积环境。其中,娄山关组下段整体  $Z$  值相对较大,其发育含膏白云岩,印证了其古海洋盐度相对较高(图 2);而清虚洞组及娄山关组下段局部发育淡水环境碳酸盐岩(表 1、图 2),可能与该期大量淡水注入或淋滤相关, $Z < 120\text{‰}$  的碳酸盐岩大多为泥—粉晶白云岩(表 1),故  $Z$  值能大致判断成岩流体性质。

#### 3.3 古海平面变化

锶同位素是古海平面变化的指示剂, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值与海平面变化密切相关<sup>[8]</sup>。海水中锶主要有两个来源:大陆岩石风化的陆源锶(全球平均  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值为 0.711 9)及洋中脊热液交换和海底玄武岩热液蚀变供应的幔源锶(全球平均  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值为 0.703 5)<sup>[25-26]</sup>。显然,陆源锶相对幔源锶具有相对较高的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值。当海平面下降时,陆地面积变大,进入海洋的陆源锶增加, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值相对升高;当海平面上升时,多伴随海底扩张加速期,因而进入海水的幔源锶增加。此外,海平面上升使古陆地面积减小,造成海洋陆源锶含量减少。两因素相互叠加使得海水的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值相对降低<sup>[8-9]</sup>。因此,海平面变化与  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值具有负相关性<sup>[8-9,25-26]</sup>(图 2)。

羊场剖面寒武系样品的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值都在 0.709 0 以上(表 1),表明样品中可能混入了放射性成因的锶<sup>[27]</sup>。早寒武世晚期至晚寒武世晚期(清虚洞组—娄山关组),整体上  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值具有增大趋势,



对应海平面震荡下降(图2)。其中,龙王庙阶—徐庄阶(清虚洞组—高台组),海平面高位震荡海进,对应4期海平面升降旋回,灰质、白云质碳酸盐岩及泥质岩交互出现(图2);张夏阶—崮山阶,海平面震荡下降,沉积了一套蒸发成因的膏云岩(图2);长山阶—凤山阶,海平面缓慢上升,堆积大套局限台地相的白云岩,整体上对应4期海平面升降旋回(图2)。

镇雄羊场剖面早寒武世晚期到中寒武世早期,海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值整体具变大趋势,其原因可能与泛非洲—巴西利亚造山运动造成硅质碎屑岩风化和侵蚀的速率增加有关<sup>[27-28]</sup>,进而为海水提供了更多的陆源铈;中寒武世晚期,铈同位素演化曲线较为平坦,反映在陆表海碳酸盐台地演化背景下,沉积作用的均一性和海平面变化的稳定性<sup>[27]</sup>;晚寒武世,海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的持续下降至奥陶纪,可能与晚寒武世—奥陶纪的淹没事件相关<sup>[29]</sup>。整体上,羊场剖面寒武纪海水的铈同位素演化曲线在长期旋回上具有较好的全球可对比性<sup>[27-29]</sup>。

此外,根据碳、氧同位素的来源及影响因素分析,海平面变化也与与 $\delta^{13}\text{C}$ 升降呈明显的正相关关系,与 $\delta^{18}\text{O}$ 升降呈一定的负相关关系<sup>[8-9,28]</sup>(图2)。因此,碳、氧及铈同位素能相互印证、有效表征古海平面的变化情况,可作为层序划分的依据。

### 3.4 古海洋环境特征间的耦合关系

碳、氧及铈同位素等地球化学参数可有效表征古海洋环境演化与变迁<sup>[5-8]</sup>,且各参数在厘定古海洋环境特征过程中可相互补充、相互检验,而古盐度、古温度及古海平面等古环境特征之间也存在一定的耦合关系。地质历史过程中,构造运动或冰期与间冰期交替,导致海平面升降变化<sup>[8]</sup>,往往伴随着海水古盐度与古温度的等一系列连锁变化。如冰期多伴随着海平面的下降、盐度升高与温度降低,其造成海水中 $\delta^{18}\text{O}$ 增大、 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值减小。间冰期则反之。因此,古海洋环境为一有机整体,古盐度、古温度与古海平面等古海洋环境特征之间存在联动关系,正是存在此耦合关系,才能更有效的利用碳酸盐岩记录的碳、氧及铈同位素特征反过来重塑古海洋环境。

## 4 地质意义

### 4.1 碳、氧同位素的地层学意义

碳、氧同位素变化曲线存在低频波动,即碳、氧同位素组成突变形成的阶梯或强振幅波动。低频波动与灾变事件相关<sup>[10]</sup>,而灾变事件往往对应区域或全

球性的变化,具有地层学意义,可作为等时地层的划分对比的依据<sup>[30]</sup>。本次在羊场剖面中下寒武统地层中,在岩性组合及生物学标志的基础上划定的地层界线附近加密取样,进行碳、氧及铈同位素分析,探索地层划分的地球化学变化与证据。

图2中同位素曲线特征揭示:清虚洞组与金顶山组界线处,碳、氧同位素均表现为负偏的突变阶梯,可见低频波动。而铈同位素比值偏正,对应海退,岩性组合发生突变,由碎屑岩转化为碳酸盐岩沉积为主;高台组与清虚洞组界线处,碳、氧同位素整体表现为低幅度正偏,快速变化,暗示沉积环境变化频繁。而铈同位素比值偏负,对应海进,沉积相对深水环境的泥质白云岩;娄山关组下段与高台组界线处,碳、氧同位素具有由偏正到偏负的趋势,突变明显。而铈同位素比值偏正,对应海平面下降,露头可见溶蚀孔洞发育(图4A)。同位素地层划分与岩石地层划分相互吻合,验证了利用碳、氧同位素特征划分地层的可行性。

### 4.2 有利储层发育的成岩环境

羊场剖面寒武系碳酸盐岩样品实测孔隙度(图2)及野外露头、铸体薄片证实(图4),滇黔北地区碳酸盐岩储层主要为娄山关组。

羊场剖面娄山关组储层岩石类型主要为砂屑白云岩及细晶白云岩,其储集空间为粒间溶孔及晶间溶孔(图4)。野外露头实测娄山关组顶部49层灰白色粉晶白云岩,溶蚀孔洞顺层发育,大小一般在5 mm左右,未充填(图4A)。50层为砂屑白云岩,溶蚀孔发育,表现为典型的准同生岩溶作用(图4E),可能与处于古地貌高部位,滩体暴露,持续接受淡水淋滤改造,其溶蚀孔洞发育;而位于古地貌低处滩体短暂暴露,岩溶作用较弱,溶蚀孔则相对不发育(图4F)。纵向上,相对优质储层分布在海平面相对下降旋回的顶部或海平面相对上升旋回的底部(图2),具备发育岩溶作用的成岩环境。

岩溶作用是大气水改造碳酸盐储层最为重要的地质过程之一,由于大气水具有比海水更高的Mn含量和更低的Sr含量,且氧化条件下以高价状态存在的Fe、Mn会被大气水淋滤充填在角砾间的基质中而使其含量变高<sup>[31]</sup>。娄山关组白云岩具有富铁(平均含量 $6.956\times 10^{-6}$ )、富锰(平均含量 $324.75\times 10^{-6}$ )与相对贫铈的特点(平均含量 $72.62\times 10^{-6}$ ,另有两块样品Sr含量小于 $5\times 10^{-6}$ ,见表1),表明该白云岩发育于完全开放的大气水环境。娄山关组白云岩样品的Sr/

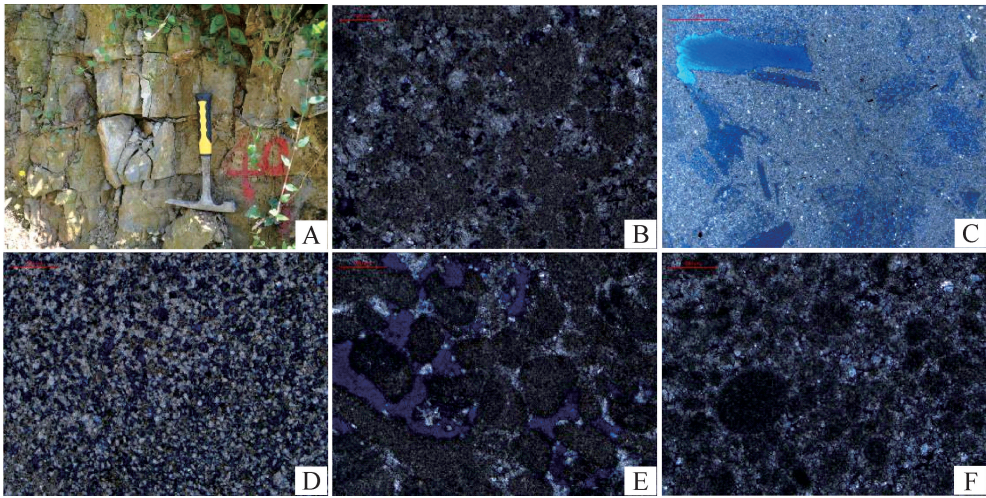


图 4 羊场剖面寒武系碳酸盐岩显微照片

A.羊场剖面,49 层,娄山关组,灰白色粉晶白云岩,溶蚀孔、洞顺层发育;B.YC-26-B2,娄山关组,砂屑白云岩,粒间溶孔发育;C.YC-30-B1,娄山关组,砾屑白云岩,溶蚀形成孔洞,孔隙度 23.7%;D.YC-43-B2,娄山关组,细晶白云岩,晶间孔及晶间溶孔发育,孔隙度 11.3%;E.YC-49-B1,娄山关组,砂屑白云岩,粒间溶孔发育,孔隙度 4.39%;F.YC-50-B1,娄山关组,砂屑白云岩,溶孔发育,孔隙度 5.62%。

Fig.4 The microphotographs showing characteristics of the Cambrian in the Yangchang section

Ba 值绝大部分小于 1(图 5),也暗示成岩流体有大气淡水的混入<sup>[19]</sup>,其白云岩具有较高的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值,分布范围介于 0.709 756~0.733 585 之间,平均值为 0.717 253,证实娄山关组白云岩成岩受淡水中陆源铈的影响。

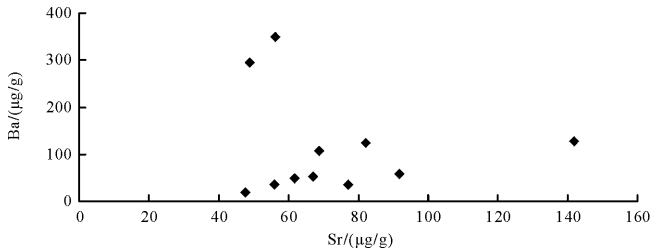


图 5 羊场剖面娄山关组铈钡含量散点图

Fig.5 The scatter diagram of strontium and barium composition of the Loushanguan Formation in the Yangchang section

微量元素地球化学特征揭示娄山关组成岩流体整体特征为:富 Fe、富 Mn 及贫 Sr, $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值弱负偏,高<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值的强氧化性低温大气水。黔北拗陷娄山关期有利储集相带以局限台地沉积的颗粒滩和云坪粉细晶白云岩为主,富含 CO<sub>2</sub> 的强氧化性低温大气水对碳酸盐岩的溶解作用强烈,可形成古岩溶型储层(图 4)。此外,娄山关组碳、氧同位素显示粉细晶白云岩具埋藏成因(表 1、图 3),埋藏溶蚀与岩溶作用相叠加,发育超大溶孔、粒间与晶间溶孔(图 4),形成该区最有利的储集层段。

5 结论

- (1) 碳、氧及铈同位素能有效反映古老碳酸盐岩的古环境特征,古海洋环境特征之间存在一定的耦合关系,亦可作为地层层序划分的地球化学依据。
- (2) 滇黔北拗陷寒武系碳酸盐岩整体处于海相环境,属温暖或炎热的亚热带气候。同位素演化曲线表明寒武纪碳酸盐岩主要经历 8 期海平面相对升降旋回。
- (3) 微量元素、同位素地球化学及岩石学特征揭示了娄山关组的成岩流体性质,其强氧化性低温大气水的岩溶改造作用显著。娄山关组有利储层纵向上主要分布在相对变浅旋回高部位。

参考文献 (References)

1 罗顺社,汪凯明. 元素地球化学特征在识别碳酸盐岩层序界面中的应用——以冀北拗陷中元古界高于庄组为例[J]. 中国地质,2010, 37(2):430-437. [ Luo Shunshe, Wang Kaiming. The application of element geochemical characteristics to the recognition of carbonate sedimentary sequence boundary: A case study of the Mesoproterozoic Gaoyuzhuang Formation in northern Hebei depression[J]. Geology in China, 2010, 37(2): 430-437. ]

2 Korte C, Kozur H W, Veizer J.  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values of Triassic brachiopods and carbonate rocks as proxies for coeval seawater and palaeotemperature[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2005, 226(3/4): 287-306.

3 Emrich K, Fnhah D H. Carbon isotope fluctuation during the precipita-

- tion of calcium carbonate[J]. *Earth Planet Science Letter*, 1970, 8: 363-371.
- 4 Scholle P A, Arthur M A. Carbon isotope fluctuations in Cretaceous pelagic limestones: potential stratigraphic and petroleum exploration tool[J]. *AAPG Bulletin*, 1980, 64(1): 67-87.
- 5 张秀莲. 碳酸盐岩中氧、碳稳定同位素与古盐度、古水温的关系[J]. *沉积学报*, 1985, 3(4): 17-30. [Zhang Xiulian. Relationship between carbon and oxygen stable isotope in carbonate rocks and paleosalinity and paleotemperature of seawater[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1985, 3(4): 17-30.]
- 6 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 carbonate rock from the Mesoproterozoic Gaoyuzhuang Formation in the Kuancheng area, Hebei province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(4): 492-499.]
- 7 罗顺社, 吕奇奇, 席明利, 等. 湖北九溪、沅古坪下奥陶统等深岩类型、碳氧同位素特征及沉积环境[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(5): 745-755. [Luo Shunshe, Lü Qiqi, Xi Mingli, et al. Types, carbon/oxygen isotope characteristics and depositional environments of the Lower Ordovician contourites in Jiuxi and Yuanguping of north Hunan province, China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(5): 745-755.]
- 8 严兆彬, 郭福生, 潘家永, 等. 碳酸盐岩 C, O, Sr 同位素组成在古气候、古海洋环境研究中的应用[J]. *地质找矿论丛*, 2005, 20(1): 53-56, 65. [Yan Zhaobin, Guo Fusheng, Pan Jiayong, et al. Application of C, O and Sr isotope composition of carbonates in the research of paleoclimate and paleoceanic environment[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2005, 20(1): 53-56, 65.]
- 9 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.]
- 10 桑树勋, 郑永飞, 张华, 等. 徐州地区下古生界碳酸盐岩的碳、氧同位素研究[J]. *岩石学报*, 2004, 20(3): 707-716. [Sang Shuxun, Zheng Yongfei, Zhang Hua, et al. Researches on carbon and oxygen stable isotopes of Lower Paleozoic carbonates in Xuzhou area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(3): 707-716.]
- 11 魏国齐, 杜金虎, 徐春春, 等. 四川盆地高石梯—磨溪地区震旦系—寒武系大型气藏特征与聚集模式[J]. *石油学报*, 2015, 36(1): 1-12. [Wei Guoqi, Du Jinhu, Xu Chunchun, et al. Characteristics and accumulation modes of large gas reservoirs in Sinian-Cambrian of Gaoshiti-Moxi region, Sichuan Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 36(1): 1-12.]
- 12 徐春春, 沈平, 杨跃明, 等. 乐山—龙女寺古隆起震旦系—下寒武统龙王庙组天然气成藏条件与富集规律[J]. *天然气工业*, 2014, 34(3): 1-7. [Xu Chunchun, Shen Ping, Yang Yueming, et al. Accumulation conditions and enrichment patterns of natural gas in the Lower Cambrian Longwangmiao Fm reservoirs of the Leshan-Longnusi Paleohigh, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(3): 1-7.]
- 13 黄文明, 刘树根, 王国芝, 等. 四川盆地地下古生界油气地质条件及气藏特征[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(3): 465-476. [Huang Wenming, Liu Shugen, Wang Guozhi, et al. Geological conditions and gas reservoir features in Lower Paleozoic in Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(3): 465-476.]
- 14 张建勇, 罗文军, 周进高, 等. 四川盆地安岳特大型气田下寒武统龙王庙组优质储层形成的主控因素[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(11): 2063-2074. [Zhang Jianyong, Luo Wenjun, Zhou Jin'gao, et al. Main origins of high quality reservoir of Lower Cambrian Longwangmiao Formation in the giant Anyue gasfield, Sichuan Basin, SW China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(11): 2063-2074.]
- 15 姜华, 汪泽成, 杜宏宇, 等. 乐山—龙女寺古隆起构造演化与新元古界震旦系天然气成藏[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(2): 192-200. [Jiang Hua, Wang Zecheng, Du Hongyu, et al. Tectonic evolution of the Leshan-Longnusi Paleozoic uplift and reservoir formation of Neoproterozoic Sinian gas[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(2): 192-200.]
- 16 杨剑, 易发成, 侯兰杰. 黔北黑色岩系的岩石地球化学特征和成因[J]. *矿物学报*, 2004, 24(3): 285-289. [Yang Jian, Yi Facheng, Hou Lanjie. Genesis and petrogeochemistry characteristics of Lower Cambrian black shale series in northern Guizhou[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2004, 24(3): 285-289.]
- 17 李娟, 于炳松, 郭峰. 黔北地区下寒武统底部黑色页岩沉积环境条件与源区构造背景分析[J]. *沉积学报*, 2013, 31(1): 20-31. [Li Juan, Yu Bingsong, Guo Feng. Depositional setting and tectonic background analysis on Lower Cambrian black shales in the north of Guizhou province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(1): 20-31.]
- 18 左景勋, 彭善池, 朱学剑. 扬子地台寒武系碳酸盐岩的碳同位素组成及地质意义[J]. *地球化学*, 2008, 37(2): 118-128. [Zuo Jingxun, Peng Shanchi, Zhu Xuejian. Carbon isotope composition of Cambrian carbonate rocks in Yangtze Platform, South China and its geological implications[J]. *Geochimica*, 2008, 37(2): 118-128.]
- 19 王鹏万, 张润合, 斯春松, 等. 滇黔川地区灯影组储层特征及其主控因素[J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2014, 29(6): 35-41. [Wang Pengwan, Zhang Runhe, Si Chunsong, et al. Reservoir characteristics of Dengying Formation in Dian-Qian-Chuan area and their control factors[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2014, 29(6): 35-41.]
- 20 Kaufman A J, Jacobsen S B, Knoll A H. The vendian record of Sr and C isotopic variations in seawater: implications for tectonics and paleoclimate[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 120(3/4): 409-430.
- 21 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.
- 22 邵龙义. 碳酸盐岩氧、碳同位素与古温度等的关系[J]. *中国矿业大学学报*, 1994, 23(1): 39-45. [Shao Longyi. The relation of the oxygen and carbon isotope in the carbonate rocks to the paleotemperature etc[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1994, 23(1): 39-45.]



- 23 Craig H. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters [J]. *Science*, 1961, 133 (3467): 1833-1834.
- 24 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.
- 25 黄思静, 吴素娟, 孙治雷, 等. 中生代海水锶同位素演化和古海洋事件 [J]. *地学前缘*, 2005, 12(2): 133-141. [Huang Sijing, Wu Sujuan, Sun Zhilei, et al. Seawater strontium isotopes and paleo-oceanic events over the past 260 Ma [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(2): 133-141.]
- 26 Palmer M R, Edmond J M. The strontium isotope budget of the modern ocean [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1989, 92(1): 11-26.
- 27 黄思静, 石和, 毛晓冬, 等. 重庆秀山寒武系锶同位素演化曲线及全球对比 [J]. *地质论评*, 2002, 48(5): 509-516. [Huang Sijing, Shi He, Mao Xiaodong, et al. Evolution of Sr isotopes of the Cambrian sections in Xiushan, Chongqing, and related global correlation [J]. *Geological Review*, 2002, 48(5): 509-516.]
- 28 Montañez I P, Osleger D A, Banner J L, et al. Evolution of the Sr and C isotope composition of Cambrian oceans [J]. *GSA Today*, 2000, 10: 1-7.
- 29 Denison R E, Koepnick R B, Burke W H, et al. Construction of the Cambrian and Ordovician seawater  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  curve [J]. *Chemical Geology*, 1998, 152(3/4): 325-340.
- 30 郭福生, 彭花明, 潘家永, 等. 浙江江山寒武系碳酸盐岩碳氧同位素特征及其古环境意义探讨 [J]. *地层学杂志*, 2003, 27(4): 289-297. [Guo Fusheng, Peng Huaming, Pan Jiayong, et al. A probe into the carbon and oxygen isotopic characteristics of the Cambrian carbonate rocks in Jiangshan, Zhejiang and its paleo-environment significance [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2003, 27(4): 289-297.]
- 31 文华国, 陈浩如, 温龙彬, 等. 四川盆地东部石炭系古岩溶储层成岩流体: 来自流体包裹体、微量元素和 C、O、Sr 同位素的证据 [J]. *岩石学报*, 2014, 30(3): 655-666. [Wen Huaguo, Chen Haoru, Wen Longbin, et al. Diagenetic fluids of paleokarst reservoirs in Carboniferous from eastern Sichuan Basin: some evidence from fluid inclusion, trace element and C-O-Sr isotope [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(3): 655-666.]

## Characteristic of the Cambrian Carbonate Paleo-ocean Environment in the Dianqianbei Depression and Its Geological Significance

WANG PengWan<sup>1,2</sup> SI ChunSong<sup>1</sup> ZHANG RunHe<sup>1,2</sup> LI XianJing<sup>1,2</sup>

MA LiQiao<sup>1,2</sup> HUANG Ling<sup>1,2</sup> XU YunJun<sup>1,2</sup> LU HuiLi<sup>1,2</sup>

(1. PetroChina Hangzhou Institute of Petroleum Geology, Hangzhou 310023, China;

2. CNPC Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** In order to clarify the characteristic of the Cambrian carbonate paleo-ocean environment, to reveal the potential contact of diagenetic fluid and karstification, and predict favorable reservoir development zone, based on the measured carbonate rock outcrop and the system samples, using the trace elements, strontium, carbon and oxygen isotopes and casting thin section data, geochemistry and petrology method, discuss the carbonate paleo-ocean environment and the geological significance. The results show that Qingxudong Formation-Loushanguan Formation of the Cambrian as a whole for the Marine environment in the Dianqianbei depression, the ancient ocean temperature between 12.82 °C ~ 32.84 °C, subject to warm or hot subtropical climate. Sea level has a main shock downward trend, there are 8 periods of sea level change cycle, development of the corresponding lithofacies combination, and isotope evolution curve can be taken as the basis of stratigraphic classification. Trace element geochemical characteristics confirmed the Loushanguan Formation karstification relative development, diagenetic fluid mixed with strong oxidizing atmosphere water at low temperature, favorable reservoir are mainly distributed in the sea level falling high part of the cycle.

**Key words:** Cambrian; carbonate; carbon, oxygen and strontium isotope; paleo-ocean environment; geological significance