

辽河西部凹陷白云岩成因机制研究

邢亚冰 张 燧 毛红平 余少伟 黄世杰
重庆科技学院 重庆 400000

摘要: 白云岩成因机制对我国陆相湖盆非常规油气勘探开发具有重要意义。本文在前人对辽河西部凹陷白云岩成因机制的研究方法和成果基础上,综合岩心特征以及地球化学分析实验中的碳氧同位素、主微量元素分析实验数据,对辽河西部凹陷地区白云岩成因机制展开研究并明确研究区白云岩成因机制主要为蒸发模式成因以及热液成因两种成因模式为主。

关键词: 白云岩;成因机制;辽河西部凹陷;蒸发成因模式;热液成因模式

Study on genetic mechanism of dolomite in west Liaohe depression

Yabing Xing, Yi Zhang, Hongping Mao, Shaowei Yu, Shijie Huang
Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 400000

Abstract: The genesis mechanism of dolomite has significant implications for unconventional oil and gas exploration and development in onshore basins in China. Building upon the research methods and findings of previous studies on the genesis mechanism of dolomite in the western Liaoxi Depression, this paper integrates rock core characteristics and geochemical analysis experimental data, including carbon and oxygen isotopes, as well as major trace element analysis. The study investigates the genesis mechanism of dolomite in the western Liaoxi Depression area, and it clarifies that the primary genesis mechanisms for dolomite in the study area are evaporative and hydrothermal models.

Keywords: Dolomite; Causal Mechanisms; Depression in the Western Part of the Liaohe; Evaporation Genetic Model; Hydrothermal Genetic Model

引言:

近年来,在我国非常规油气资源的勘探开发进程的进一步发展,我国陆相湖盆泥页岩层系油气资源也逐步成为我国非常规油气资源开发重点。由于我国陆相湖盆泥页岩层系油气资源的储集层多与湖相碳酸盐岩有关,储层中含有大量的白云岩,甚至存在以白云岩类为主的储集层。因此了解白云石成因机制能够极大程度地推进我国非常规油气资源开发进程^[1, 2]。本文在前人对辽河西部凹陷白云岩成因机制的研究方法和成果基础上利用地球化学分析数据,对研究区白云岩成因机制进行分析研究。

一、地质概况

辽河西部凹陷是位于中国大陆东部边缘一个呈北东向展布的渤海裂谷系东北端的箕形断陷盆地,辽河西部凹陷的形成与演化主要受渤海湾盆地边缘断层控制。研

究区内沙河街组地层自下而上分为四段,其中目的层段沙四段地层发育薄层泥岩为主,夹杂有薄层泥灰岩以及白云质灰岩,测井解释呈现出齿状低电阻率特征,中上部岩性以碳酸盐岩为标志,并将沙四段分为三个准层序,自下而上分别为PS1, PS2以及PS3^[3]。

二、白云岩成因分析

通过野外露头观测和岩心观察,结合前人分析测试资料,以白云石含量为主线,综合参考岩石微观结构、有机质丰度和热演化程度指标,以及前人研究区白云岩成因机制的研究方法和成果^[4, 5],本次研究主要运用地球化学特征,借助碳氧同位素分析、微量元素分析等分析数据,对研究区泥页岩储层中白云岩的成因机制展开分析。

1. 碳氧同位素分析

$\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 由于可以很好地反映气温的变化与水

体的盐度，为此白云岩中的碳氧同位素组成的分析数据常被用来研究湖泊水文学、古湖水化学和古气候，可用于佐证白云岩的成因。

在不同的沉积水体环境白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值数值有所区分，一般情况下正常湖相碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值范围分别为在 $-2.0\text{‰} \sim 6.0\text{‰}$ 和在 $-8.0\text{‰} \sim -4.0\text{‰}$ 之间。而据实验结果分析，研究区样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布在 $-3.80\text{‰} \sim 5.00\text{‰}$ 之间， $\delta^{18}\text{O}$ 值分布在 $-12.60\text{‰} \sim -6.00\text{‰}$ 之间（表1）。依据不同环境以及成因下 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 含量的不同可以对研究区白云岩的成因做出大致的判断（表2）。经比对可知研究区白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ ，与蒸发成因白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ ， $\delta^{18}\text{O}$ 特征相似，并且沙四下段地层在埋藏时期都经历过一定程度的热液作用改造。

表1 碳同位素分析化验结果

序号	样品	井深, m	$\delta^{13}\text{CPDB}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{OPDB}\text{‰}$
1	4	3169.57	2.87	-9.81
2	28	3175.35	0.76	-8.23
3	99	3194.83	3.69	-8.52
4	120	3235.11	-3.89	-13.71
5	140	3240.37	1.92	-13.41
6	164	3246.73	2.03	-9.51
7	172	3248.59	-1.74	-8.93
8	192	3252.94	1.23	-10.17
9	257	3277.70	3.45	-6.00
10	334	3296.12	4.28	-10.95
11	342	3297.97	4.92	-12.69
12	428	3328.00	3.32	-8.52

表2 不同环境碳氧同位素分布范围

沉积环境及成因	海水环境	混合水成岩环境	大气淡水成岩环境	深埋藏环境	热液成因	蒸发模式成因
$\delta^{13}\text{C}$ 值范围	较小正值或近零负值	$-9.0\text{‰} \sim -5.5\text{‰}$	高负值	近零正值	$-3.0\text{‰} \sim 5.0\text{‰}$	$-2\text{‰} \sim 2\text{‰}$
$\delta^{18}\text{O}$ 值范围	接近于零	$-3.5\text{‰} \sim 5.5\text{‰}$	高负值	埋深加大而减小	$-10.0\text{‰} \sim -5.0\text{‰}$	$-8\text{‰} \sim -4\text{‰}$ PDB

根据前人的研究成果，我们可以对侏罗系以及之后更晚时代的海水和淡水灰岩产生区分。根据其推导出的方程式（式1.1）对碳酸盐岩计算得到的结果表明Z值大于120的碳酸盐岩归类为海水型碳酸盐岩，Z值小于120的碳酸盐岩归类为淡水型碳酸盐岩，而接近于120的碳酸盐岩则被定义为未定型。

$Z=2.048 \times (\delta^{13}\text{C}+50) + 0.498 \times (\delta^{18}\text{O}+50)$ (PDB标准) (式1.1)

依据式1.1对本次研究区内碳酸盐岩展开计算得到实验数据，研究区内碳酸盐岩Z值介于119.20~131.40之间，其平均值为127.40，可归类于海水型碳酸盐岩，表明研究区内具有明显的海侵特征。

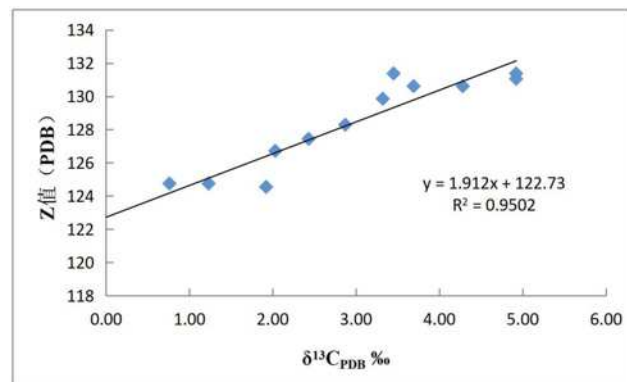


图1 研究区 $\delta^{13}\text{C}$ -Z关系图

氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}$) 值可以用来表征白云岩形成时的环境温度，利用（式1.2）对氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}$) 值展开计算。

$$T=13.85-4.54 \times \delta^{18}\text{O}+0.04 (\delta^{18}\text{O})^2 \text{ (PDB标准)} \quad \text{(式1.2)}$$

通过公式计算可知研究区白云岩具有较高的成岩温度，其平均温度可达63℃，表明研究区白云岩成岩阶段属于蒸发环境。

2. 主、微量元素分析

(1) M值

M值是可以用来表征沉积物形成时水体环境中的盐度和指示沉积物供给来源的综合指标，主要是反映沉积水体环境的盐度特征。

在不同的水体沉积环境，M值的变化范围有所不同：M值<1指示为淡水沉积环境；1<M值<10指示为陆海过渡性水体沉积环境；10<M值<500指示为海水沉积环境；M值>500指示为泻湖碳酸盐沉积环境。本次研究的研究区沙四段白云岩样品M值主要分布在10~500区间范围内，表现为海水沉积环境。

(2) Sr、Ba元素特征

Sr（锶），Ba（钡）元素以及二者之间的比值Sr/Ba都可以用来指示水体环境。Sr元素的含量可以用来反映

水体的盐度，一般来说海水成岩环境中Sr的含量要大于大气淡水成岩环境，湖相沉积环境中，咸水湖成岩环境Sr元素的质量分数要大于淡水湖成岩环境的质量分数。Ba元素在海相沉积环境的含量较少，在陆相沉积环境含量较多。一般情况下Ba元素在海相沉积环境的含量为 $10 \times 10^{-6} \sim 30 \times 10^{-6}$ ，含量最多为 200×10^{-6} 。Sr、Ba元素二者的比值Sr/Ba在其 > 1 时指示海相咸水沉积环境， $0.6 < Sr/Ba < 1$ 时为海陆过渡相半咸水沉积环境， $Sr/Ba < 0.6$ 时为陆相淡水沉积环境。

研究区内目的层沙四段白云岩Sr元素含量介于 $150 \times 10^{-6} \sim 1300 \times 10^{-6}$ ，平均值为 550×10^{-6} ，其元素含量偏低；Ba元素含量介于 $240 \times 10^{-6} \sim 1340 \times 10^{-6}$ ，Ba元素含量平均值为 550.16×10^{-6} （图2），这说明研究区白云岩含量主要来源于陆相沉积物；研究区内白云岩Sr/Ba比值在.01-3.65之间，其平均值为0.96，表示研究区白云岩形成于淡水-微咸水沉积水体环境。

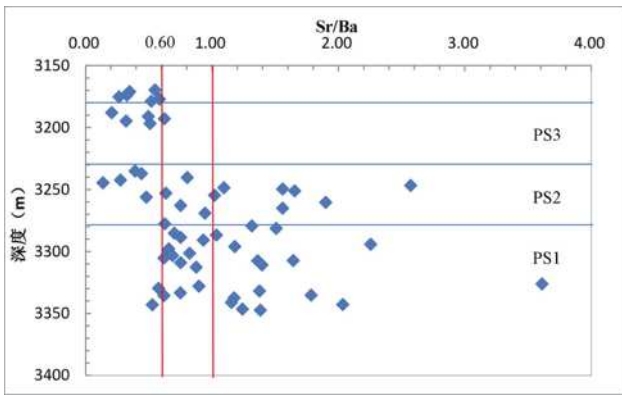


图2 Sr/Ba分布特征图

(3) Th、U元素特征分析

在不同的沉积环境中，U元素会以不同的状态赋存，在还原环境中U元素以难溶的+4价氧化物存在，在氧化环境中难溶的+4价U元素氧化物会转变为+6价的碳酸盐矿物流失。而Th元素价态较为稳定，无论是氧化环境还是还原环境都会以+4价赋存在沉积岩矿物中，U元素一般是海相沉积物中的含量大于陆相沉积物，而Th元素则与U元素相反。因此可以用Th/U的比值来判断沉积环境是氧化性还是还原性。

海相沉积环境中黑色页岩与石灰岩中的蒸发岩的 $Th/U < 2$ ， $2 < Th/U < 6$ 指示为海相灰绿色页岩，当 $Th/U > 6$ 时则表示为陆相页岩。研究区沙四段白云岩样品的Th/U值介于2.60~9.15之间，平均值为5.90（图3），表明研究区沙四段白云岩形成环境是还原-弱氧化沉积环境。

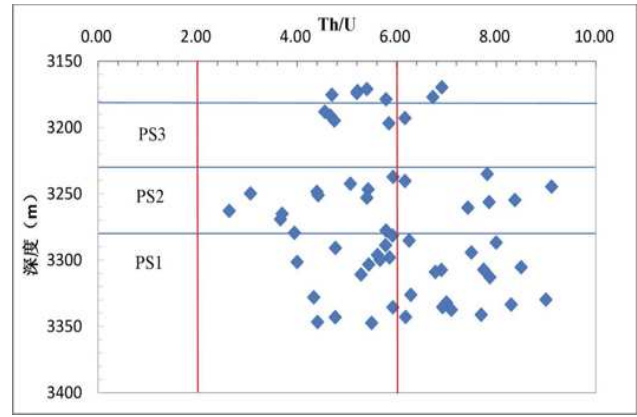


图3 Th/U分布特征图

(4) 钒（V）、镍（Ni）元素特征

V元素在氧化环境中容易被胶体或者黏土吸附而在沉积岩中富集沉积，Ni元素会在还原环境中富集。根据V、Ni在不同环境中富集的特点，我们可以利用V/(V+Ni)的比值来反映白云岩沉积环境的氧化还原性。依据前人研究成果：利用V/(V+Ni)以及黄铁矿矿化程度（DOP）两者共同表征沉积环境，即 $DOP > 0.67$ ， $V/(V+Ni) > 0.54$ 表示为含 H_2S 的厌氧环境；在DOP相对含量较低的情况下， $V/(V+Ni)$ 介于0.45~0.60之间则表示为贫氧环境； $V/(V+Ni) < 0.45$ 时即为氧化环境。经过对辽河西部凹陷沙河街组四段地层硫以及V/(V+Ni)特征分析（图4），在PS1和PS3准层序二者数值特征较高，指示相对还原的沉积环境；而在PS2准层序地层其数值较低，表示其沉积环境相对氧化。

通常镍（Ni）、铬（Cr）、钴（Co）、钒（V）、钛（Ti）等微量元素的含量在海相沉积物中较为丰富，陆相沉积物中微量元素含量较少。其中若微量元素 $Ni > 40 \times 10^{-6}$ 的沉积物属于海相沉积物，反之属于陆相沉

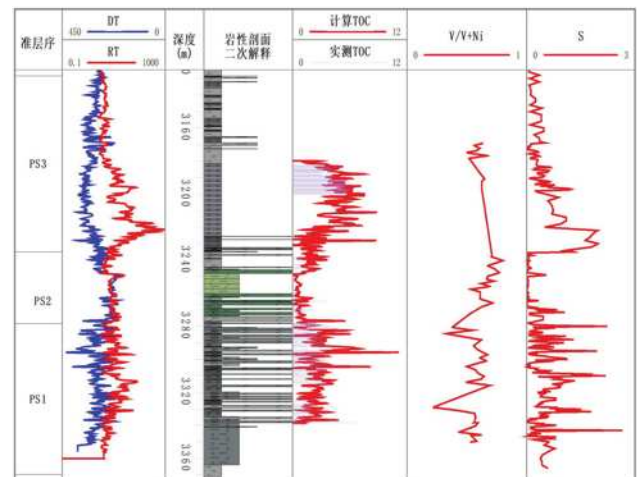


图4 研究区沙四段S/(V+Ni)分布特征

积物。研究区内白云岩样品微量元素Ni含量均值为 80.38×10^{-6} ，高值可达 262×10^{-6} ，这表明辽河西部凹陷白云岩样品属于受海水影响的微量元素分布特征。

三、结束语

本次研究通过利用碳氧同位素分析，主、微量元素分析等地球化学手段，以研究区沉积相特征、岩石学特征、成岩作用特征以及地球化学特征为基础对研究区白云岩的成因机制作出系统的研究。经研究可知辽河西部凹陷沙四下段泥页岩白云岩成因：在目前比较成熟的六种白云岩成因：蒸发模式、混合水模式、渗透回流模式、埋藏模式、海水模式以及热液成因模式中，研究区沙四段白云岩成因模式主要为蒸发模式成因以及热液成因模式两种成因模式。

参考文献：

- [1]杨扬. 稀土元素在碳酸盐岩成岩环境分析中的应用[J]. 长春工程学院, 2017.
- [2]李红, 柳益群, 朱玉双. 新疆三塘湖盆地二叠系湖相白云岩形成机理初探[J]. 沉积学报, 2007.
- [3]徐玳笠, 许露露, 龚志愚等. 辽河西部凹陷古近系页岩类型及测井识别[J]. 资源环境与工程, 2022, 36(01): 17-22. DOI: 10.16536/j.cnki.issn.1671-1211.2022.01.003.
- [4]李甜, 代宗仰, 李阳等. 辽河西部凹陷雷家地区古近系沙四段湖相白云岩成因[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(02): 75-85.
- [5]周雪松. 白云石对陆相湖盆泥页岩层系储层脆性的影响定量研究[D]. 东北石油大学, 2018.