

许红, 张海洋, 李绪深, 等. 西永 2 井铁白云岩 Fe 同位素地球化学性质及特征[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(6): 1-7.

# 西永 2 井铁白云岩 Fe 同位素地球化学性质及特征

许红<sup>1,2\*</sup>, 张海洋<sup>3</sup>, 李绪深<sup>4</sup>, 沈江远<sup>1,5</sup>, 马骁<sup>2,6</sup>, 付和平<sup>2,6</sup>,  
张道军<sup>4</sup>, 苏大鹏<sup>2</sup>, 闫桂京<sup>2</sup>, 董刚<sup>2</sup>, 刘新宇<sup>4</sup>, 闫琢玉<sup>7</sup>

(1 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061; 2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071; 3 河北省地震局保定中心台, 保定 071000; 4 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 湛江 524057; 5 长江大学, 武汉 430100; 6 中国石油大学(华东), 青岛 266580; 7 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 湛江 524057)

**摘要:**白云岩发现于 200 多年前, 至今仍然是地球科学研究前沿。西沙群岛白云岩研究超过 35 a, 发现铁白云岩 10 a, 属于研究热点。本文在西永 2 井前期铁白云岩测试研究基础上, 采集典型铁白云岩岩心样品, 完成 Fe 同位素测试, 通过对比多种地质储层 Fe 同位素特征, 阐述定位该批测试数据的性质、特征和分析其母源, 提出加强投入, 与高尖石岛火山岩铁同位素测试结果地球化学特征溯源对比分析的建议。该项研究对于铁白云岩成因特征和机制研究具有重要价值。

**关键词:**西永 2 井; 铁白云岩; 高尖石岛火山岩; Fe 同位素; 地球化学性质及特征

中图分类号: P736.4; P588.24

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.002

## 0 引言

白云岩存在于大部分古代碳酸盐岩矿物岩石中, 理想白云岩有一个被  $\text{CO}_3$  离子层分开的连续 Ca-Mg 结构层, 在化学计量  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  中, Ca-Mg 离子层均衡排列。铁白云岩则是白云岩形成过程中, Mg 离子晶格被 Fe 离子占位, 有关二者关系和具体占位特征的研究报道不多。

作为碳酸盐岩两大岩石类型和三大矿物类型之一, 白云石(岩)于 1791 年被发现, 至今已逾 229 a, 学术界已提出数十种白云岩成因模式<sup>[1-2]</sup>, 说明不同沉积环境中发现的解决方案极具多样性及多解性。在现代野外沉积中尚未发现白云岩, 实验室低温合成也是一个问题, 形成所谓的“白云岩问题”。事实上, 白云岩问题缺乏中国解决方案。不仅因为白云岩的岩石成因特征和机制理论研究具有顶级难度和全球性意义, 还因为全球碳酸盐岩中白云岩分布的广泛性。碳酸盐岩分布面积占全球沉积岩总面

积的 20%, 具有极大的经济价值, 全球高达 90% 的油气储量发现于海相地层, 碳酸盐岩蕴藏油气储量占世界总储量的 52%, 而 50% 碳酸盐岩油气储层是白云岩<sup>[3]</sup>, 包括塔里木、四川最新深层大气田<sup>[4-5]</sup> 和南海几乎全部现已发现生物礁油气田的储层都是白云岩; 白云岩甚至还主导了大多数密西西比型 Zn-Pb 矿及许多矽卡岩矿<sup>[2]</sup> 的形成, 凸显白云岩研究深厚的理论意义和能源勘探经济价值。

鉴于白云岩研究的难度, 笔者选择性切入铁白云岩 Fe 同位素来源的特征<sup>[6]</sup>, 通过铁白云岩中铁白云石 Fe 同位素测试, 讨论铁同位素测试技术、数据结果与地球化学性质和特征, 以期推进相关工作进程。

## 1 铁白云岩的发现与研究

2011 年 7 月, 笔者编录永兴岛西永 2 井 390.04~600.33 m 中新世岩心, 发现除第 1 回次 390.04~391.90 m 为正常乳白、浅黄灰色以外<sup>[7]</sup>, 第 2 回次以下百余米多呈铁黑色, 现场定名火山碎屑沉积灰岩。茜素红染色为白云岩, 全岩化学分析铁为优势矿物, 最高含铁量超过贫铁矿达到 29%, 并富含 Cu、W、Zn、Cr 等重金属; 1 年后, 发现系统 X 光粉晶衍射谱(图 1)图属于标准铁白云石 [( $d=2.9062$ ) 33-

收稿日期: 2021-01-04

资助项目: 国家自然科学基金(41872114); 国家科技基础资源调查专项课题(2017FY201407)

\* 第一/通讯作者简介: 许红(1957-), 男, 博士, 研究员, 主要从事油气地质调查与资源勘探评价及海洋生物礁成因研究工作. E-mail: qdxhong@163.com

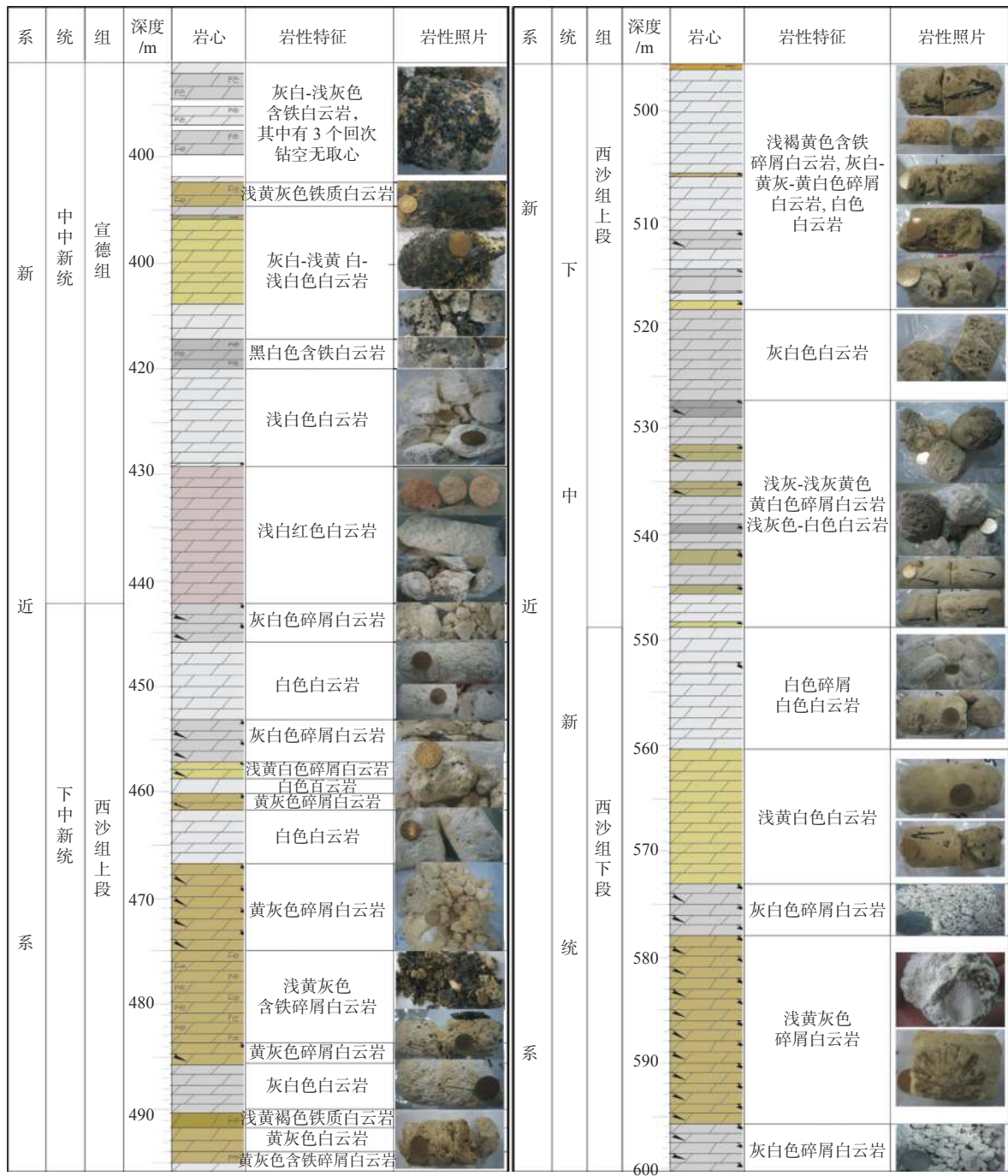


图1 西永2井新近系岩心剖面柱状图

Fig.1 Column diagram of Neogene core section of well Xiyong 2

0282] [8]; 这些铁白云石共计6层, 分布于该井百米深度范围; 先后发现有铁质白云岩、含铁白云岩, 现统称铁白云岩。

2014年5月, 笔者负责油气重大专项钻穿西沙群岛生物礁科探井——西科1井地质钻井任务书设计、井位选定与现场监理, 承担岩心生物礁成因特征尤其是储层孔渗层特征研究。2015年3月, 完成该井1257.52 m以浅白色、灰白色生物礁岩心系统测试, 发现中新世井段3层总厚超过300 m白云

岩[9]; 通过深层次研究, 发现其中16个深度属于铁白云岩。假如说西永2井铁白云岩的发现是“一孔之见”, 西科1井铁白云岩的再次发现则是“多孔之见”, 也是30余年来西沙群岛生物礁白云岩研究的首次。这说明西沙群岛铁白云岩的分布具有普遍性, 可能代表了一种全新的孤立岛屿环境及白云岩成因新的机制, 但尚无相关研究内容的报道。

事实上, 西沙群岛远离大陆, 属于大陆坡[10]深水环境, 因此, 西永2井发现的大量铁及其重金属

源自何方<sup>[7]</sup>, 是铁白云岩形成关键, 因为海水中镁元素来源不成问题, 但大量铁元素的来源或是解释难点, 以期此研究推进相关认识。

## 2 材料与方 法

### 2.1 材 料

选取西永 2 井岩心剖面(图 1)典型铁白云岩<sup>[7]</sup>。通过前期研究, 完成了相关深度岩心样品的 X 光粉晶衍射测定, 确认都为代表性典型铁白云岩, 每样称重 3~5 g, 经规范处理后送样至中国科技大学进行 Fe 同位素测试分析。

### 2.2 测试仪器

本次实验利用双聚焦多接收器等离子体质谱

仪(Nu Plasma HR), 主要是由等离子源、扇形静电分析器(ESA)、扇形磁场分析器(MSA)和信号检测器所组成(图 2)<sup>[11]</sup>。整个测试仪器整体可分成 3 个部分, 分别是离子源与接口区、双聚焦区和变焦透镜与信号接收器。等离子源区是由 3 个石英同心试组成, 称为等离子炬管, 样品测试时, 炬管内温度达到 6 000~7 000 K, 高温可使 Fe 元素产生电离; 接口区则由采样锥和截取锥构成, 元素所产生的离子经接口区冷水冷却后, 进入 ESA。离子双聚焦是指对离子能量和方向进行聚焦, 在仪器中可通过 ESA 和 MSA 合理匹配来完成; 之后经变焦透镜变焦, 再将离子束分别聚焦到信号接收器中。此外, 双聚焦多接收器等离子体质谱仪与外部计算机相接, 通过控制软件对进样、离子源、仪器物理参数、电压、背景值计算以及信号接收等系统进行实时监测与调节, 以确保实验数据的准确性。

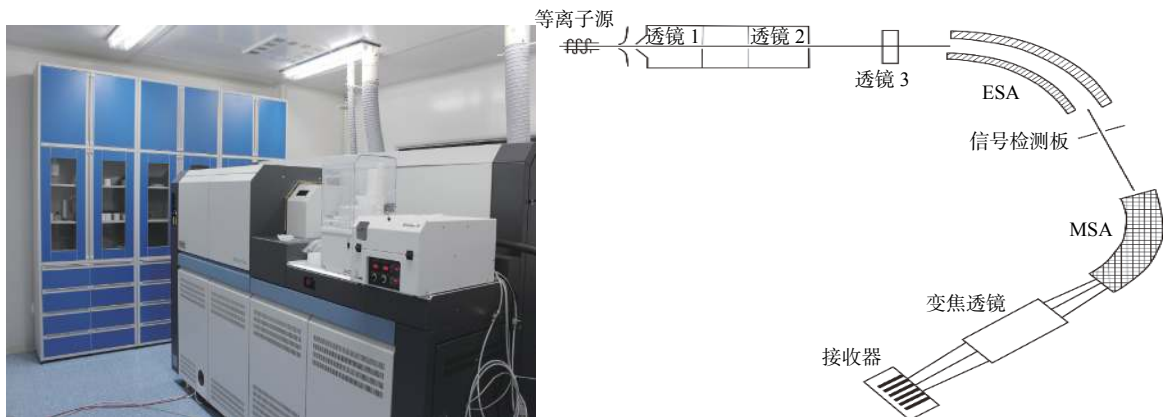


图 2 Nu Plasma HR 型 MC-ICP-MS 实图和结构示意图

Fig.2 Nu Plasma HR type MC-ICP-MS real diagram and structural diagram

### 2.3 样品预处理: 制备、纯化与抗干扰处理

**样品制备:** 利用碳酸盐岩遇酸易溶特点, 取 2 g 样品放入玛瑙钵中研磨至 200 目, 放入洁净密封的 7 mL Savillex Teflon 溶样器中。室温条件下, 将所有的样品加入 5 mL 浓度 10% HAc 溶液, 静置在 7 mL Savillex Teflon 容器中溶解 24~48 h, 间隔性放入振荡器中半小时, 使得样品充分溶解<sup>[12]</sup>。完成消解后将溶液进行离心, 将离心好的溶液加入 0.5 mL 高浓度 HNO<sub>3</sub> 重复蒸干, 以驱替样品中 HAc 溶液, 并加入适量的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 确保待测样品以 Fe<sup>3+</sup> 存在。

**样品纯化:** 由于岩心中含有除铁元素之外其他种类丰富的化学成分, 在进行同位素测试时能够对 Fe 同位素谱峰产生干扰, 也将造成实验测试时的质

量歧视的变化, 称之为基质效应<sup>[13-14]</sup>。因此, 在运用 MC-ICP-MS 实验之前, 都将对样品进行纯化。

**抗干扰处理:** Fe 同位素测量的关键是消除其他化学元素(表 1)的干扰。样品制备过程中, 已用化学溶液排除 Cr、Ni 对 Fe 同位素的干扰。除此之外, 对 Fe 同位素测试的干扰还来自等离子体的氩气以及空气和溶液的 ArN<sup>+</sup> 和 ArO<sup>+</sup><sup>[15]</sup>。因此, 要采用 MC-ICP-MS 将这些同质异位素进行有效分离, 采用高分辨率进行测试。

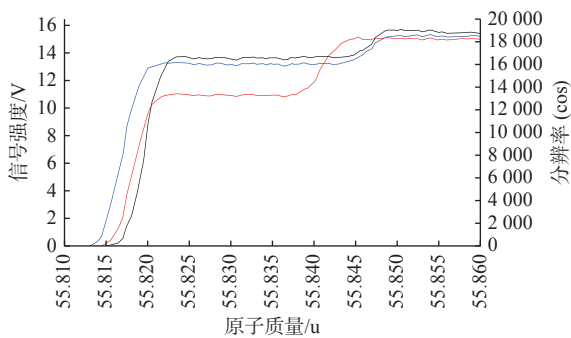
Nu Plasma HR 型多接收等离子体质谱仪在实验测试时, 根据样品需要会采用高、中、低 3 种不同模式的分辨率; 由于 ArN 和 ArO 的质量分数分别为 53.965 和 55.95729 与 <sup>54</sup>Fe、<sup>56</sup>Fe 的质量分数大致相等, 要想将 2 种影响因素消除, 实验测试时所需

表1 影响 Fe 同位素的潜在干扰信号

Table 1 Potential interference signals affecting Fe isotope results

同位素	质量数	天然丰度/%	干扰元素
<sup>54</sup> Fe	53.939 61	5.84	<sup>54</sup> Cr, [ <sup>27</sup> Al <sup>27</sup> Al] <sup>+</sup> , [ <sup>37</sup> Cl <sup>16</sup> OH] <sup>+</sup> , [ <sup>40</sup> Ca <sup>12</sup> Cl] <sup>+</sup> , [ <sup>40</sup> Ca <sup>14</sup> N] <sup>+</sup> , [ <sup>40</sup> Ar <sup>14</sup> N] <sup>+</sup>
<sup>55</sup> Fe	55.934 94	91.76	[ <sup>28</sup> Si <sup>28</sup> Si] <sup>+</sup> , [ <sup>40</sup> Ca <sup>14</sup> N] <sup>+</sup> , [ <sup>40</sup> Ar <sup>16</sup> O] <sup>+</sup>
<sup>56</sup> Fe	56.935 4	2.12	[ <sup>40</sup> Ar <sup>17</sup> OH] <sup>+</sup> , [ <sup>40</sup> Ar <sup>17</sup> O] <sup>+</sup>
<sup>57</sup> Fe	57.933 28	0.28	<sup>58</sup> Ni, [ <sup>40</sup> Ar <sup>18</sup> O] <sup>+</sup>

的分辨率应>4 800。本次实验测试所选用是高分辨模式,分辨率值达8 000,远远超过多原子与Fe有效分离的标准。在高分辨模式下,多原子干扰信号与真正样品信号特征见图3。因此,选择图3较平坦中间位置取值,既可避免ArO对Fe的干扰,也能保证数据的准确性。



红色线代表<sup>54</sup>Fe信号,绿色线代表<sup>56</sup>Fe信号,蓝色线代表<sup>57</sup>Fe信号,后面升起来的部分为Fe+ArO

图3 高分辨下Fe同位素与干扰峰分离

Fig.3 High resolution separation of Fe isotope from interference peak

Fe同位素测试结果用相对国际标准物质IRMM-014的千分之偏差 $\delta^x\text{Fe}$ 表示,公式为<sup>[14, 16]</sup>:

$$\delta^{56}\text{Fe}(\text{‰}) = \left[ \left( \frac{{}^{56}\text{Fe}}{{}^{54}\text{Fe}} \right)_{\text{样品}} / \left( \frac{{}^{56}\text{Fe}}{{}^{54}\text{Fe}} \right)_{\text{IRMM-014}} - 1 \right] \times 1000 \quad (1)$$

$$\delta^{57}\text{Fe}(\text{‰}) = \left[ \left( \frac{{}^{57}\text{Fe}}{{}^{54}\text{Fe}} \right)_{\text{样品}} / \left( \frac{{}^{57}\text{Fe}}{{}^{54}\text{Fe}} \right)_{\text{IRMM-014}} - 1 \right] \times 1000 \quad (2)$$

### 3 结果

样品Fe同位素测试结果见图4,给出了Fe同位素 $\delta^{56}\text{Fe}$ 随深度变化特征与铁含量的对应曲线关系。可见铁白云岩Fe同位素总的变化范围为 $\delta^{56}\text{Fe}=0.12\text{‰} \sim 0.46\text{‰}$ ,平均值为0.32‰,2SD,  $n=3$ 。 $\delta^{57}\text{Fe}=0.23\text{‰} \sim 0.65\text{‰}$ ,平均值为0.49‰,2SD,  $n=3$ 。相对于国际标准物质IRMM-014,本次所测试的铁

白云岩样品显示重同位素富集特征。

由图4,深度396.2~457.5 m,  $\delta^{56}\text{Fe}$ 范围值为0.35‰~0.12‰,变化范围较大,呈减小趋势;深度457.5~554.0 m,  $\delta^{56}\text{Fe}$ 值范围为0.12‰~0.43‰,变化范围较大,呈上升趋势。总体来看,  $\delta^{56}\text{Fe}$ 在396.2~554 m深度整体上分布比较均匀,仅在457.5 m处出现较大变化。对比发现,Fe元素含量在457.5 m出现突增的状态,因此,Fe元素含量与 $\delta^{56}\text{Fe}$ 整体上存在负相关关系,此现象似乎与对鞍山-本溪地区BIF铁同位素组成特征一致<sup>[17]</sup>。

## 4 讨论

### 4.1 各类岩石中Fe同位素的组成

地球上存在多种类型的岩石,因其成因不同,它们的Fe同位素组成也不尽相同(图5)。

#### 4.1.1 火成岩中的Fe同位素

地球的上火成岩几乎具有相同的Fe同位素组成。朱祥坤等<sup>[15]</sup>针对地幔橄榄岩及辉石包体开展Fe同位素研究,确定 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值范围约-0.15‰~0.08‰; BEARD等<sup>[18]</sup>选取高镁铁质岩石、玄武岩以及陆壳硅质火成岩等46个样品进行Fe同位素研究,认为 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值为-0.09‰。POITRASSON等<sup>[19]</sup>对来自地幔的橄榄岩、玄武岩、辉长岩等13个样品展开Fe同位素研究,确定 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值范围为0~0.11‰。

#### 4.1.2 沉积岩中的Fe同位素

沉积岩又分为碎屑沉积岩与化学沉积岩。碎屑沉积岩中 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值变化范围较小,  $\delta^{56}\text{Fe}$ 为0.02‰±0.07‰,与火成岩类似。化学沉积岩主要包括化学沉淀碳酸盐岩、胶体溶液中沉淀的某些铁质岩、铁锰结核以及条带状含铁建造(BIF)。与火成岩相比,铁锰结核中 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值变化较大,  $\delta^{56}\text{Fe}$ 变化范围为-0.77‰~0.32‰。最新研究表明,前寒武纪中BIF存有变化范围最大的Fe同位素组成,  $\delta^{56}\text{Fe}$ 值为-3.5‰~2.3‰<sup>[20]</sup>。

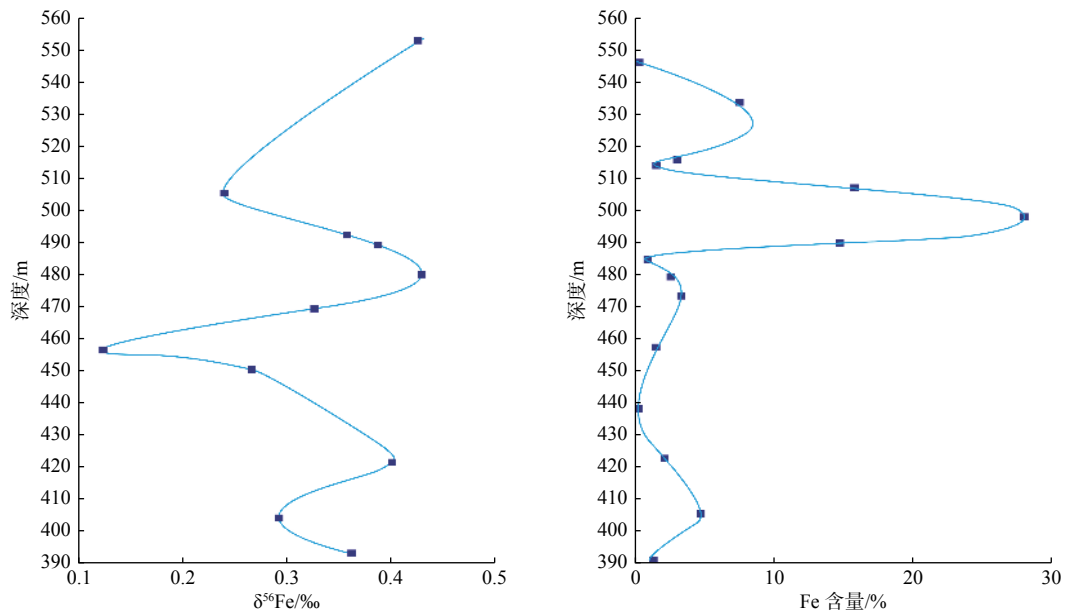


图 4 西永 2 井铁白云岩铁同位素  $\delta^{56}\text{Fe}$  随深度的变化

Fig.4 Variation of  $\delta^{56}\text{Fe}$  in ferroan dolomite with depth of well Xiyong 2

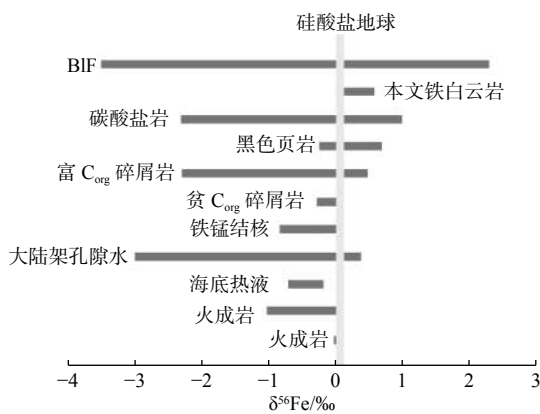


图 5 不同地质储库的 Fe 同位素组成

Fig.5 Fe isotopic composition in different geological reservoirs

#### 4.1.3 碳酸盐岩中的 Fe 同位素

$\delta^{56}\text{Fe}$  值变化范围也比较大, 这是因为不同成因的碳酸盐岩, 其同位素的分馏系数不同。上侏罗统白云岩研究最新  $\delta^{56}\text{Fe}$  平均值为 11‰(数据来自文献对  $\delta^{57}\text{Fe}$  的重新估算)<sup>[21]</sup>, 南非新太古代 Transvaal 组条带状含铁建造中碳酸盐岩成岩过程中的铁白云石  $\delta^{56}\text{Fe}$  值范围  $-0.32\text{‰} \sim -0.88\text{‰}$ (平均值为  $-0.46\text{‰}$ ,  $n=25$ ) 和菱铁矿  $\delta^{56}\text{Fe}$  值范围  $-1.01\text{‰} \sim -0.04\text{‰}$ (平均值为  $-0.52\text{‰}$ ,  $n=5$ )<sup>[20]</sup>。美国含铁建造碳酸盐岩样品  $\delta^{56}\text{Fe}$  值范围  $-0.57\text{‰} \sim -0.92\text{‰}$ (平均值为  $-0.58\text{‰}$ ,  $n=6$ )<sup>[22]</sup>。太古宙叠层石样品  $\delta^{56}\text{Fe}$  值范围  $2.1\text{‰} \sim 0.5\text{‰}$ , 泥盆纪与石炭纪微生物碳酸盐岩  $\delta^{56}\text{Fe}$  值介于  $2.1\text{‰} \sim 0.5\text{‰}$ 。

#### 4.1.4 海水中的 Fe 同位素

现代海洋的铁主要来自于海洋环境中的 Fe 元素, 来源包括陆源碎屑物质、河流物质输入、海底热流以及大陆架流体等<sup>[23-24]</sup>, 具体包括:

(1) 海水陆源碎屑沉积物中的 Fe 同位素 包括陆源沉积物、重力流沉积物以及火山碎屑岩, 其 Fe 同位素组成与火成岩  $\delta^{56}\text{Fe}$  值相似, 约为  $0.09\text{‰}$ <sup>[20]</sup>。河流沉积物中的 Fe 元素以离子及胶体的形式存在, Fe 同位素值介于  $-1\text{‰} \sim 0$ , 相对于火成岩较为年轻<sup>[18]</sup>。

(2) 河流物质中的 Fe 同位素 河流入海口处由于 Fe 元素溶解度不同引起的差异性分离作用与风化作用, 导致含重 Fe 同位素物质普遍沉淀以及含轻 Fe 同位素的物质优先溶解, 使得河流输入海水中的 Fe 同位素值变得更轻。

(3) 海底热液中的 Fe 同位素 一般认为, 海底热流系统是深海海水中主要的铁的来源。其  $\delta^{56}\text{Fe}$  值范围为  $-0.69 \sim -0.21\text{‰}$ , 较火成岩偏低  $0 \sim 0.6\text{‰}$ , 显示较轻的 Fe 同位素富集。海底风化过程中形成的次生含铁矿物中发生显著的 Fe 同位素的分馏<sup>[25]</sup>, 尤其是, 流失 Fe 元素较多的古老玄武岩比新生玄武岩  $\delta^{56}\text{Fe}$  值高约  $1.3\text{‰}$ , 证实风化扰动过程中轻 Fe 同位素最早淋滤出来。

(4) 大陆架孔隙流体中的 Fe 同位素 在成岩阶段早期存在一个较大的 Fe 同位素分馏值<sup>[26]</sup>, 任何靠近大陆架含高浓度  $\text{Fe}^{2+}$  的含氧蓄水层或孔隙流

体,都将提供大量的轻 Fe 同位素,并进入海水。

#### 4.2 西永 2 井铁白云岩岩心中的铁同位素

目前,前人针对西沙群岛所有的生物礁科探井岩心发现,多为正常白色-灰白色-浅灰-深灰黄色等生物礁沉积序列。在西永 2 井 391 m 以深沉积序列中,所发现为深黄-棕黑色沉积物(图 1),含铁及重金属异常,但相关研究报道不多;因而解释其特征,对比分析它们的来源或为相关研究最重要环节。

如图 4,通过铁同位素测试,发现西永 2 井 600 m 以浅 10 个深度样品铁白云岩铁同位素  $\delta^{56}\text{Fe}$  最小 0.12‰,最大 0.46‰;  $\delta^{57}\text{Fe}$  最小 0.23‰;最大 0.65‰;表明重同位素富集;10 个铁同位素值均低于铁质岩、铁锰结核以及条带状含铁建造(BIF),高于碳酸盐岩等全部岩石和各种岩石类型及铁锰结核,特别是与河流-火成岩来源铁同位素值不同;很难确认此研究样品的铁同位素更接近于谁。

现实情况中,我们先前分析曾经认定:属于大陆坡<sup>[10]</sup>的西沙群岛远离大陆,铁白云岩显然形成赋存于该孤立生物礁-碳酸盐岩台地及其深水环境。因此,这样的孤立岛礁海洋环境不可能赋存,更不可能提供大量铁与重金属元素。问题在于,在西永 2 井深几百米岩心中发现大量的铁和重金属元素,是否会源于陆源碎屑物质、河流物质输入,或与大陆架孔隙流体有关,还是来自岛礁古海洋环境,与西沙群岛唯一火山岩岛高尖石岛有关吗,通过本次对比研究,得到的结论应该说似是而非,难以确认西永 2 井 10 个铁同位素值的真正来源。因此,进一步的深入工作不可或缺,加大投入开展多井岩心样品测试是必要的。

## 5 结论与建议

环境温度下非生物合成白云石很困难,自然界条件下发现现代和全新世白云石极度稀缺,在讨论铁白云岩的时候更是如此,构成本文“铁白云石”铁元素来源的问题。但是,西沙群岛白云岩研究超过 30 a,发现铁白云岩近 10 a,后者相关研究刚刚起步,因而针对铁白云岩的研究及探讨任重道远。

西沙群岛铁白云岩铁同位素测试是铁白云岩铁同位素溯源研究的重要内容,也是铁白云岩成因特征和机制研究关键一环。西永 2 井铁白云岩岩心重铁同位素富集,将其初步与自然界的各种来源宿主铁元素铁同位素标准数据对比,尚难以确定真实

地球化学属性及宿主性来源。

后续工作拟加大投入,通过完成西科 1 井铁白云岩岩心样品和高尖石岛火山岩样品铁同位素测试,并结合西永 2 井铁同位素测试数据,实现多井测试数据对比,对于铁同位素实验岩石学、追溯铁元素来源及铁白云岩成因,都将具有重要意义。

**致谢:**感谢中国科技大学金属稳定同位素实验室完成铁同位素测试!

#### 参考文献:

- [1] CHILINGAR G V, YEN T F. Concepts and models of dolomitization[J]. *Earth-Science Reviews*, 1981, 17(3): 285-286.
- [2] WARREN J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations[J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 52(1/3): 1-81.
- [3] ZENGER D H, DUNHAM J B, ETHINGTON R L. Concepts and models of dolomitization[M]. Tulsa: SEPM Special Publication, 1980, 28: 1-328.
- [4] 许红,王修齐,张健,等.四川盆地地震旦系勘探突破与绵阳-长宁拉张槽的特征及对于下扬子区的意义[J]. *海洋地质前沿*, 2016, 32(3): 1-6.
- [5] 王修齐,许红,宋家荣,等.高石梯-龙王庙大气田发现与四川盆地地震旦-寒武系油气地质特征及成藏[J]. *海洋地质前沿*, 2016, 32(3): 24-32.
- [6] 许红.地球化学系统科学Mg-Fe同位素研究:实验岩石学与白云岩-铁白云岩中Mg-Fe同位素的地球化学行为分析与实践[C]//第七届全国稳定同位素制备与应用技术交流会,上海,2020.
- [7] XU H, ZHANG W W, WEI K, et al. Ferroan dolomites in Miocene sediments of the Xisha Islands and their genetic model[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2018, 36(1): 165-180.
- [8] 于吉顺,雷新荣,张锦化,等.矿物 X 射线粉晶鉴定手册(图谱)上册[M].武汉:华中科技大学出版社,2011.
- [9] 许红.“十二五”大型油气田和煤层气重大科技专项《南海新生代生物礁储层对比研究》成果报告[R].青岛:青岛海洋地质研究所,2015.
- [10] 王国忠.南海珊瑚礁区沉积学[M].北京:海洋出版社,2001.
- [11] 朱祥坤,李志红,赵铁苗,等.铁同位素的MC-ICP-MS测定方法与地质标准物质的铁同位素组成[J]. *岩石矿物学杂志*, 2008, 27(4): 263-272.
- [12] ZHU X K, MAKISHIMA A, GUO Y, et al. High precision measurement of titanium isotope ratios by plasma source mass spectrometry[J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2002, 220: 321-329.
- [13] 唐索寒,朱祥坤,蔡俊军,等.用于多接收器等离子体质谱铜铁同位素测定的离子交换分离方法[J]. *岩矿测试*, 2006, 25(1): 5-8.
- [14] ZHU X K, O'NIONS K R, GUO Y L, et al. Secular variation of iron isotopes in north Atlantic Deep Water[J]. *Science*, 2000, 287: 2000-2002.

- [15] 朱祥坤, 王跃, 闫斌, 等. 非传统稳定同位素地球化学的创建与发展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(6): 651-688.
- [16] BLANCKENBURG F V, MAMBERTI M, SCHOENBERG R, et al. The iron isotope composition of microbial carbonate[J]. *Chemical Geology*, 2008, 249(1/2): 113-128.
- [17] 李志红, 朱祥坤, 唐索寒. 鞍山-本溪地区条带状铁矿的BIF铁同位素特征及其对成矿机理和地球早期海洋环境的制约[J]. 岩石学报, 2012, 28(11): 3545-3558.
- [18] BEARD B L, JOLINSON C M, VON-DAMM K V, et al. Iron isotope constraints on Fe cycling and mass balance in oxygenated Earth oceans[J]. *Geology*, 2003, 31: 629-632.
- [19] POITRASSON F, HALLIDAY A N, LEE D C, et al. Iron isotope differences between Earth, Moon, Mars and Vesta as possible records of contrasted accretion mechanisms[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 223(3/4): 253-266.
- [20] JOHNSON C M, BEARD B L, BEUKES N J, et al. Ancient geochemical cycling in the earth as inferred from Fe isotope studies of banded iron formations from the Transvaal Craton[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2003, 144(5): 523-547.
- [21] MATTHEWS A, MORGANS-BELL H S, EMMANUEL S, et al. Controls on iron-isotope fractionation in organic-rich sediments (Kimmeridge Clay, Upper Jurassic, Southern England)[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(14): 3107-3123.
- [22] FROST C D, BLANCKENBURG F V, SCHOENBERG R, et al. Preservation of Fe isotope heterogeneities during diagenesis and metamorphism of banded iron formation[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2007, 153(2): 211.
- [23] SHARMA M, POLIZZOTTO M, ANBAR A D. Iron isotopes in hot springs along the Juan de Fuca Ridge[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 194(1/2): 39-51.
- [24] BEARD B L, JOHNSON C M, SKULAN J L, et al. Application of Fe isotopes to tracing the geochemical and biological cycling of Fe[J]. *Chemical Geology*, 2003, 195(1/4): 87-117.
- [25] ROUXEL O, DOBBEK N, LUDDEN J, et al. Iron isotope fractionation during oceanic crust alteration[J]. *Chemical Geology*, 2003, 202: 155-82.
- [26] SEVERMANN S, JOHNSON C M, BEARD B L, et al. The effect of early diagenesis on the Fe isotope compositions of porewaters and authigenic minerals in continental margin sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(8): 2006-2022.

## GEOCHEMICAL BEHAVIORS AND CHARACTERISTICS OF IRON ISOTOPE IN THE FERROAN DOLOMITE FROM WELL XIYONG 2

XU Hong<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Haiyang<sup>3</sup>, LI Xushen<sup>4</sup>, SHEN Jianguyuan<sup>1,5</sup>, MA Xiao<sup>2,6</sup>, FU Heping<sup>2,6</sup>, ZHANG Daojun<sup>4</sup>, SU Dapeng<sup>2</sup>, YAN Guijing<sup>2</sup>, DONG Gang<sup>2</sup>, LIU Xinyu<sup>4</sup>, YAN Zhuoyu<sup>7</sup>

(1 First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 2 Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China; 3 Baoding Center Seismic Station, Hebei Earthquake Agency, Baoding 071000, China; 4 Zhanjiang Branch of CNOOC (China) Ltd., Zhanjiang 524057, China; 5 Yangtze University, Wuhan 430100, China; 6 China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China; 7 CNOOC EnerTech-Drilling and Production Co., Zhanjiang 524057, China)

**Abstract:** The dolomite was discovered more than 200 years ago, and its research is still one of the frontier subjects in Earth Sciences. The study of dolomite on Xisha Islands is over 35 a, and ferroan dolomite was found for 10 a, which are the research hotspots. On the basis of earlier study of dolomites in well Xiyong 2, the core samples of typical ferroan dolomite are further collected for Fe isotope analysis in this study. By comparing characteristics of Fe isotope of various geological reservoirs, the properties, characteristics and the parent sources of the Fe isotope of dolomites from well Xiyong 2 are elaborated. It is suggested to strengthen the investment and correlate the geochemical characteristics with the Fe isotope test results of the volcanic rock samples from the Gajianshi Island. This study is of great value for the study of the genetic characteristics and mechanism of ferroan dolomite.

**Key words:** well Xiyong 2; ferroan dolomite; volcanic rocks of Gaojianshi Island; Fe isotope; geochemical behaviors and characteristics