

黔东北地区南华系大塘坡组冷泉碳酸盐岩及其意义

周琦^{1,2}, 杜远生¹, 王家生¹, 彭加强²

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 贵州省地矿局 103 地质大队, 贵州铜仁 554300

摘要: 黔东北及毗邻地区新元古界南华系下统铁丝垭组冰碛层(相当于 Sturtian 冰期)之上, 大塘坡组的底部分布一套黑色岩系。在一系列同期形成的断陷盆地近中心区域, 黑色岩系下部主要由菱锰矿、白云岩等碳酸盐岩组成。通过对该地区出露的这套碳酸盐岩的野外地质构造、矿物成分、碳、氧、硫稳定同位素特征的研究, 发现除碳稳定同位素表现出强烈的负偏移外, 硫同位素值表现出明显的正偏移, 还发现了大量气孔状构造和泥火山、底辟等典型构造。其特征与现代海底天然气水合物的渗漏、释放和环境突变所形成的冷泉碳酸盐岩机理一致, 进而认为这套碳酸盐岩成因是新元古界古海洋的海底天然气水合物渗漏所形成的冷泉碳酸盐岩沉积。该成果拓展了海底天然气水合物研究领域和时空范围, 对其所导致的成岩成矿作用、环境评价的分析研究提供了新思路。

关键词: 南华系; 冷泉碳酸盐岩; 大塘坡组; 黔东北。

中图分类号: P588.2

文章编号: 1000—2383(2007)03—0339—08

收稿日期: 2006—07—03

Characteristics and Significance of the Cold Seep Carbonates from the Datangpo Formation of the Nanhua Series in the Northeast Guizhou

ZHOU Qi^{1,2}, DU Yuan-sheng¹, WANG Jia-sheng¹, PENG Jia-qiang²

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Geological Team 103, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources, Tongren 554300, China

Abstract: In the Northeast Guizhou and its surrounding, a series of black shales covering the till sheet of Tiesiao Formation which is thought to be formed during the Sturtian, distributes at the bottom of Datangpo Formation, lower Nanhua Series, Neoproterozoic. Generally, the lower part of the black shales is mainly composed of carbonate such as dolomite and so on, near the center of a succession of syngenetic fault basins. Through the studies of the carbonate outcrop in this area in terms of the field structure, mineral components and the characteristics of carbonate, oxygen and sulfur isotopes, it is shown that sulfur isotope presents distinct positive excursion in contrast with carbonate isotope that indicates an intense negative excursion. In addition, a mount of stomatal dolomite and significant structures like mud volcano, diapirs and so on have been found. Based on the above features, the studied carbonate is supposed to have come into being under the same mechanisms as modern cold venting carbonate on the sea floor via the seep and release of gas hydrate and the environmental mutation. Therefore a simple conclusion is obtained that the carbonate for research is possible to be generated on the ancient ocean floor in the Proterozoic as the deposition of cold venting carbonate because of the gas hydrate seep. This study widens the research areas for the ocean floor gas hydrate and its spatial and temporal distribution, supplying a new idea for the analysis of the diagenesis, mineralization and environmental assessment.

Key words: Nanhua Series; cold venting carbonate; Datangpo Formation; Northeast Guizhou.

0 引言

近些年的海底探测新发现了不少海底复杂而奇特的自然现象, 便于我们研究地质历史时期十分费解的地质问题, 通过将今论古的方式找到了答案. 20 世纪 70 年代阿尔文号深海考察船在东太平洋隆海底直接观察到洋底的高温流体的热泉之后, 掀起了研究大洋底热水(热泉)沉积作用的热潮(Ballard, 1984; 陈多福等, 2002; 徐兆凯等, 2006). 冷泉流体是继洋中脊以下盆源中高温流体的热泉被发现和研究之后的又一个新的盆地流体沉积领域(Kulm *et al.*, 1986; Lallenmand *et al.*, 1992). 科学界将深海中发现的热泉和在近大陆地区发现的冷泉归属于 20 世纪最后 25 年中最重要的发现(Лейн, 2006).

冷泉是以天然气和水为主的流体在海底的渗漏活动——海底天然气渗漏(gas venting), 广泛发育于大陆边缘, 部分渗漏天然气在海底之下的沉积物中结晶为水合物; 同时, 在海底附近形成了以渗漏天然气化学成分变化产生的能量为基础的化学自养生物群落, 通过这些生物的生命活动, 部分渗漏甲烷被氧化为二氧化碳, 沉淀为冷泉碳酸盐岩(Peckmann *et al.*, 2001; Campbell *et al.*, 2002; Peckmann and Thiel, 2004). 尽管甲烷氧化的生物化学途径目前还不完全清楚, 但最近的分子地球化学、同位素和系统发育学研究表明, 渗漏系统还原带的渗漏甲烷的缺氧氧化是甲烷古细菌(archaea)和硫酸盐还原细菌(sulfate reduction bacteria)共同作用的结果, 这些渗漏甲烷的微生物作用已被实验室对渗漏系统分离的细菌的观察及生物标志化合物的研究所证实(Hinrichs *et al.*, 1999; Hinrichs *et al.*, 2000; Pancost *et al.*, 2000).

现代冷泉碳酸盐岩主要分布在深水区海底或近表层水合物发育区, 一般是沿断裂线性分布, 是天然气渗漏活动强烈的地区. 在美国墨西哥湾、我国南海北部、鄂霍茨克等海底分布广泛的冷泉碳酸盐岩, 均具有特别负的碳同位素值和特殊的结构构造特征(Orange *et al.*, 1999; 陈多福等, 2005; 冯东等, 2005).

目前, 对地质历史时期中的冷泉碳酸盐岩的研究报道很少, 特别是南华纪冷泉碳酸盐岩研究还未见报道. 本文结合国内外现代冷泉碳酸盐岩研究的最新成果, 对黔东南地区南华系大塘坡组菱锰矿层及白云岩的特征进行研究后认为, 它应是较为典型

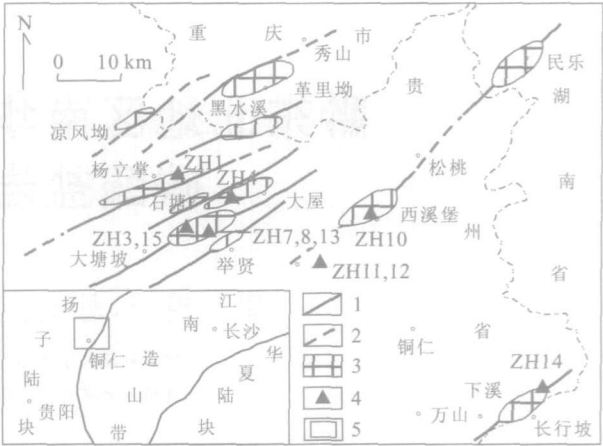


图 1 黔东南南华系大塘坡组冷泉碳酸盐岩分布
Fig.1 Distribution of cold seep carbonates from Datangpo Formation of Nanhua in the Northeastern Guizhou
1. 实测古断裂; 2. 推测古断裂; 3. 冷泉碳酸盐岩分布范围; 4. C、O 同位素采样位置; 5. 研究区位置、范围

的古代冷泉碳酸盐岩.

1 区域地质背景

研究区位于扬子陆块东南边缘与江南造山带的结合部位. 由于全球性的 Rodinia 超大陆裂解, 在华南形成了新元古代被动陆缘裂谷盆地(殷鸿福等, 1999; 王剑, 2000), 并由于断裂、拉张作用形成多个拉张盆地. 在这些盆地中, 控制了黔东南地区南华纪早期冷泉碳酸盐岩(菱锰矿+白云岩)的形成和分布(图 1).

冷泉碳酸盐岩位于南华系大塘坡组底部, 之下为铁丝垌组(相当于 Sturtian 冰期)冰碛含砾岩屑杂砂岩. 冷泉碳酸盐岩所在的黑色含锰岩系自上而下其岩性特征如下(以松桃大塘坡剖面为例):

上覆岩性: 大塘坡组第二段深灰色粉砂质页岩, 与下伏地层呈整合接触. 厚> 200 m.

- (8) 黑色至深灰色含锰炭质页岩, 局部夹粘土岩及含凝灰质细砂岩透镜体. 厚 5. 02 m.
- (7) 黑色炭质页岩, 夹锰质条纹, 见少量细粒黄铁矿分布. 厚 4. 27 m.
- (6) 深灰色、黑色条带状菱锰矿透镜体及黑色炭质页岩, 顶部偶见含锰白云岩. 菱锰矿透镜体数量少、厚度小, 不均匀分布. 见少量细粒黄铁矿星散分布. 厚 0. 69 m.
- (5) 黑色炭质页岩, 局部含锰质, 见少量细粒黄铁矿星散分布. 厚 2. 17 m.
- (4) 浅灰色、灰色薄至中层凝灰质细砂岩, 细粒黄铁矿多, 局部含炭质. 厚 0. 29 m.

- (3) 黑色炭质页岩, 局部含锰质较多, 见少量细粒黄铁矿星散状分布。厚 1.41 m。
- (2) 深灰黑色、钢灰色条带状、块状含气孔的炭质菱锰矿透镜体, 间夹黑色炭质页岩, 气孔中为沥青充填。见星点状细粒黄铁矿。厚 2.93 m。
- (1) 黑色炭质页岩, 局部含砂质、锰质较多, 见细粒黄铁矿星点状分布。厚 0.99 m。与下伏铁丝垌组含砾炭质细砂岩呈整合接触。

下伏岩性: 南华系铁丝垌组灰色、深灰色中层含砾炭质细砂岩, 夹锰质结构或团块, 含细粒黄铁矿较多, 呈星散状或团块状产出。厚 0.88 m。

黑色含锰岩系沿盆地走向和两侧厚度逐渐变薄, 且菱锰矿逐渐相变为白云岩; 再向外白云岩逐渐尖灭, 尖灭后仅为炭质页岩, 炭质页岩在盆地边缘也相变为浅色粘土岩。从而在平面上形成对称的岩性组合分带。

2 冷泉碳酸盐岩沉积特征

冷泉碳酸盐岩主要由沉积菱锰矿和白云岩组成, 菱锰矿分布在次级走滑盆地中心, 白云岩分布在盆地边缘, 二者相变过渡。空间上表现为透镜状(图 2e)、丘状或似层状, 沉积环境和相分析中出现纵向和横向上的不连续。沉积菱锰矿水平层理较发育, 具有块状构造、条带状构造和气孔状构造(图 2a—2c)。气孔通常被沥青所充填, 其周围常为白色玉髓镶边(图 2d)。气孔在剖面为压扁的椭圆状(图 2c), 平面上则为圆状(直径 2~11 mm)(图 2a, 2b)。主要分布在大塘坡地区, 一般位于本套冷泉碳酸盐岩岩系中下部。

在大塘坡地区的冷泉碳酸盐岩岩系中, 普遍发育泥火山(图 2f, 2g)、底辟等构造(图 2h), 菱锰矿或含菱锰矿的炭质页岩垂向流动, 刺穿或使上覆盖层上拱。泥火山垂直通道中可见菱锰矿等物质充填(图 2g)。

块状和气孔状菱锰矿主要由泥晶菱锰矿组成; 条带状菱锰矿主要由泥晶钙菱锰矿、镁钙菱锰矿与粘土质、炭质相间分布组成, 条带宽 2~6 mm。矿物成分除菱锰矿、钙菱锰矿、镁钙菱锰矿外, 见锰白云石、白云石、锰方解石、方解石, 粘土矿物、有机质炭质和草莓状、半自形晶粒状黄铁矿等矿物。后期成岩作用不明显。

菱锰矿具有泥晶结构、凝块状结构(图 2i)、草莓状黄铁矿集合体(图 2j), 藻层纹、向上凸出的叠层状构造等冷泉碳酸盐岩的典型结构构造。菱锰矿石中

见较多的球形蓝绿藻分布。

上述菱锰矿的结构构造特征, 尤其是气孔状构造(气孔中充填沥青)、生物结构、泥火山和底辟构造等特征, 这些与现代海底天然气水合物的分布、运移、渗漏, 形成泥火山等冷泉口和底辟构造, 在泥火山口及其附近发生甲烷的氧化作用, 形成自生碳酸盐, 是十分类似的。

3 稳定碳、氧同位素特征

本文系统采集了松桃、万山、江口等地区不同类型的碳酸锰矿石和白云岩样品 11 块, 经清洗并切除后期脉石后, 无污染破碎至 200 目以下。送中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室进行碳、氧同位素测试。采用磷酸法, 将样品 30~50 mg, 110 °C 烘干后与 100% H_3PO_4 在恒温水塔中平衡反应, 然后收集 CO_2 在 MAT251 同位素质谱仪上测定, 分析精度 $< 0.1\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 数据均为相对于 PDB 标准。结果见表 1。

从表 1 中可见, 黔东北地区的主要锰矿床沉积菱锰矿及外围的相变白云岩的碳稳定同位素值存在明显的负偏移。菱锰矿的 $\delta^{13}\text{C}$ 在 -8.14‰ ~ -10.38‰ 之间, 平均达 -9.46‰ , 这与高兴基、周琦等人 1984 年在相同地区所测定的菱锰矿单矿物 $\delta^{13}\text{C}$ 结果 (-8.016‰ ~ -10.698‰ , 平均值为 -9.32‰) 十分相近(刘巽锋等, 1989)。说明造成碳同位素明显负偏的主要原因是菱锰矿矿物, 而粘土质等矿物影响很小。对大塘坡地区菱锰矿矿石分析表明, 其普遍含有气孔(气孔含量 5%~30% 不等), 气孔中为沥青质所充填, 即气孔状菱锰矿矿石; 气孔中沥青的有机碳高达 44.22%(刘巽锋等, 1989), 而锰矿石中有机碳含量平均达 4.18%(解启来等, 1999), 因此造成菱锰矿等碳酸盐岩碳稳定同位素明显负偏移, 应与新元古代古海洋中甲烷水合物有关。

地球化学和微生物学研究证实, 天然气渗漏系统缺氧带甲烷氧化和碳酸盐还原作用是甲烷氧化古细菌和硫酸盐还原细菌生命活动耦合的新陈代谢过程。在天然气渗漏系统缺氧带环境中, 甲烷古细菌氧化渗漏 CH_4 , 生成 CO_2 和 H_2 ; 同时硫酸盐还原细菌消耗海水中的 SO_4^{2-} 和甲烷古细菌氧化 CH_4 所产生的 H_2 , 生成 HS^- 和 H_2O 。微生物作用产生的二氧化碳和硫化氢与孔隙中流体的钙离子、铁离子结合,

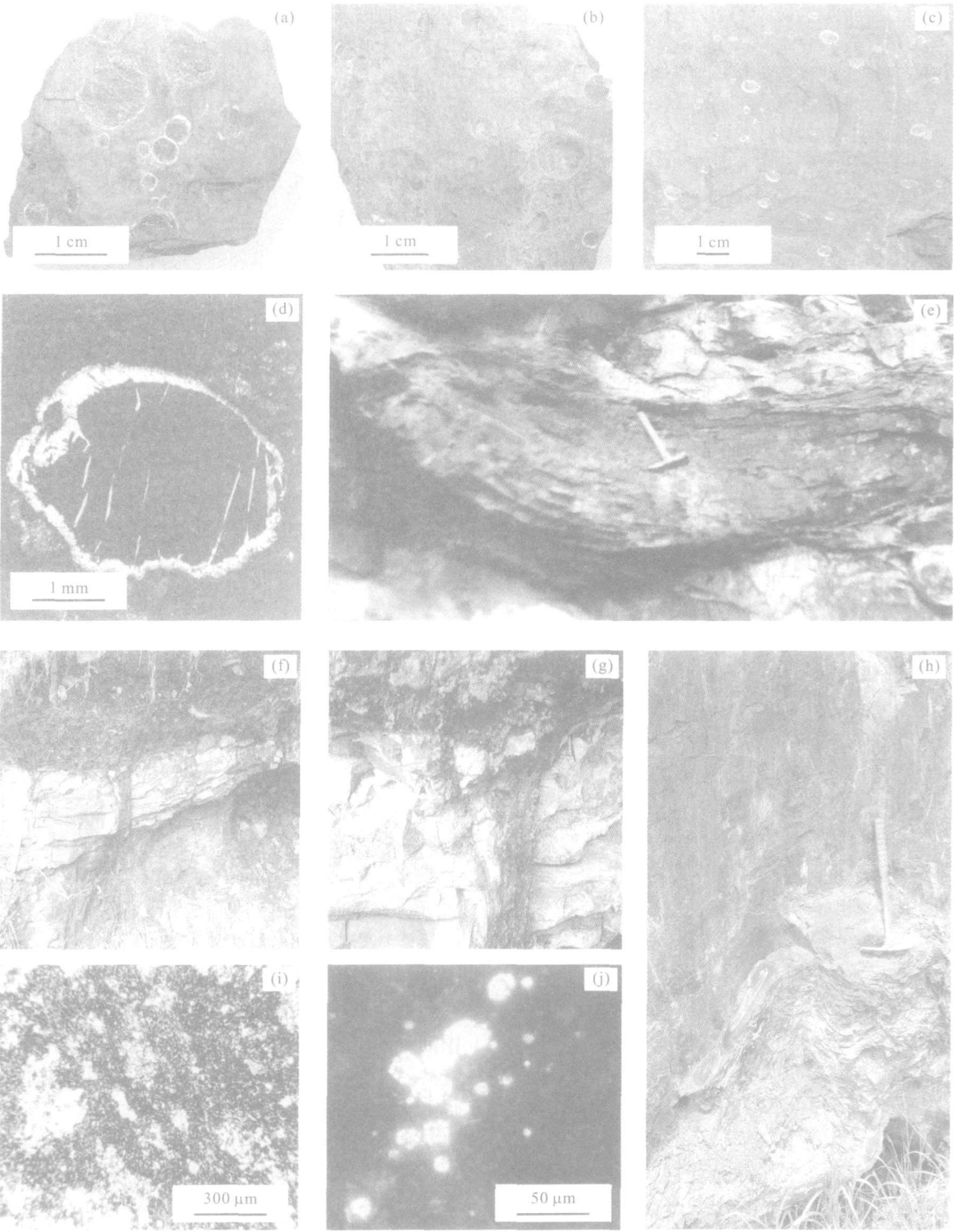


图 2 大塘坡地区冷泉碳酸盐岩沉积野外沉积及显微照片

Fig. 2 Pictures in the field and micro-photos of the cold seep carbonates from Datangpo Formation in the Northeast Guizhou

a, b, c. 气孔状构造菱锰矿矿石(手标本), 其中 a. 气孔顶面形态(呈圆状); b. 气孔底面形态; c. 气孔剖面形态(呈压扁状); d. 单个气孔放大形态(四周为白色玉髓镶边); e. 菱锰矿矿体形态; f. 发育在菱锰矿矿层上覆层中的一组泥火山构造; g. 其中一个泥火山形态(注意泥火山通道垂直层面向上发散, 通道中为菱锰矿所充填); h. 菱锰矿矿层顶部的底辟构造(地质锤把方向为上); i. 菱锰矿的泥晶和凝块状结构; j. 菱锰矿中的草莓状黄铁矿

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

表 1 黔东南冷泉碳酸盐岩的碳、氧稳定同位素测试结果

Table 1 Stable C, O isotopes of the cold seep carbonates in the Northeast Guizhou

样品号	岩性	采样地点	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	Mn(%)
ZH8	气孔状菱锰矿	大塘坡联营厂 PD1200	-10.36	-8.75	30.65
ZH7	气孔状菱锰矿	大塘坡联营厂 PD1200	-10.38	-14.06	26.14
ZH13	条带状菱锰矿	大塘坡联营厂 PD1200	-8.14	-9.60	18.10
ZH15	块状菱锰矿	大塘坡大坪 ZK909(上)	-8.25	-4.37	26.61
ZH3	块状菱锰矿	大塘坡大坪 ZK909(下)	-9.96	-9.88	26.72
ZH1	块状菱锰矿	杨立掌 PD840	-10.12	-11.81	25.05
ZH10	块状菱锰矿	西溪堡 PD1	-9.28	-8.68	25.34
ZH4	块状菱锰矿	大屋 PD650	-9.18	-11.30	24.70
ZH14	白云岩	万山下溪 ZK4401	-4.39	-9.12	\
ZH11	白云岩	江口桃映	-4.71	-15.32	1.37
ZH12	白云岩	江口桃映	-1.51	-4.72	1.31

注: Mn 含量由贵州省地矿局黔东南地矿测试中心分析.

形成碳酸盐岩和黄铁矿沉淀(冯东等, 2005), 而与锰离子结合则形成菱锰矿. 因此, 天然气渗漏系统中微生物的活动导致冷泉碳酸盐岩沉积主要受天然气渗漏作用控制. Joye *et al.* (2004) 观察到墨西哥湾天然气渗漏区域甲烷缺氧氧化和硫酸盐还原速率为非渗漏区域 50 倍以上; 在渗漏区域中, 水合物和沉积物界面处甲烷缺氧氧化和硫酸盐还原的速率表现为最高, 而水合物内部的速率则要小得多(小 1 个数量级)(Orcutt *et al.*, 2004). 表明天然气渗漏系统在空间上具有很强的非均一性(Sassen *et al.*, 2004; Zhang and Lanoil, 2004).

4 硫同位素特征

黔东南地区南华系菱锰矿中黄铁矿分布普遍. 贵州省地矿局 103 地质大队从菱锰矿中挑选黄铁矿, 宜昌地质矿产研究所 1989 年对其中的硫同位素进行了测试, 结果见表 2.

从表 2 中可见, 冷泉碳酸盐岩(碳酸锰)中黄铁矿的硫同位素值表现出明显的正偏移, 具有异常高的正值, 这是很难解释的. 据李任伟等(1996)对大塘坡锰矿床及毗邻的同时期的湖南民乐、重庆溶溪锰矿和湘潭锰矿的硫同位素研究, 发现扬子地区南华纪早期碳酸锰矿同样具有异常高的正值特征, 锰矿层之上的黑色页岩中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值迅速降低(+17.8‰~+21.3‰), 且往上至震旦系陡山沱组的黑色页岩中黄铁矿的硫同位素又出现明显变化, $\delta^{34}\text{S}$ 值从底部的一 5.9‰迅速降至-27.1‰, 故说明大塘坡期菱锰矿沉积物中黄铁矿具有异常高的硫同位素正值是一个普遍而又特殊的现象, 不太可能是

表 2 黔东南松桃地区冷泉碳酸盐岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 值测试结果

Table 2 S isotopes of the cold seep carbonates in the Songtao

样品编号	采样地点	岩性	测定对象	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)
S-1	松桃杨立掌 PD1	菱锰矿	黄铁矿	50.1
S-10	松桃杨立掌 Zk005	菱锰矿	黄铁矿	48.6
S-11	松桃杨立掌 Zk005	菱锰矿	黄铁矿	52.0
S-12	松桃杨立掌 Zk005	菱锰矿	黄铁矿	51.7
S-13	松桃杨立掌 Zk005	菱锰矿	黄铁矿	49.0
S-14	松桃杨立掌 Zk005	菱锰矿	黄铁矿	50.7
S-6	松桃大塘坡	菱锰矿	黄铁矿	55.5
S-7	松桃大塘坡	菱锰矿	黄铁矿	57.8
S-8	松桃大塘坡	菱锰矿	黄铁矿	57.3
S-2	松桃大屋	菱锰矿	黄铁矿	44.5
S-3	松桃大屋	菱锰矿	黄铁矿	36.9
S-4	松桃大屋	菱锰矿	黄铁矿	48.1
S-5	松桃大屋	菱锰矿	黄铁矿	49.3

沉积期后的次生产物. 但它与南海大洋钻探 ODP1146 站位自生黄铁矿的硫同位素值(+47.8‰~+67.1‰)相吻合(王家生等, 2005); 同时它又与现代鄂霍茨克海底的甲烷冷泉口的自生重晶石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值(21.0‰~38.6‰)相近(Greinert *et al.*, 2002). 因而从黄铁矿硫同位素特征也说明了菱锰矿的形成, 应与新元古代古海洋中天然气渗漏的背景密切相关(图 3).

黔东南地区新元古界南华系大塘坡组碳酸盐岩(菱锰矿及白云岩), 在区域上沿构造带和高渗透性地层带(铁丝坳组含砾砂岩地层大厚度分布地区)呈线性或线性群分布, 具有一定的等距性, 反映了构造控制沉积盆地, 沉积盆地控制菱锰矿及白云岩产出的特征. 碳酸盐岩沿盆地中心呈有规律的层圈状分布(如盆地中心菱锰矿厚度大、锰的含量高, 往外变薄、变贫; 盆地中心为菱锰矿, 外围逐渐相变为白云

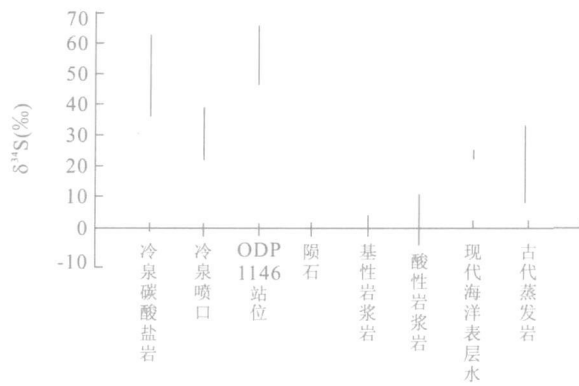


图 3 黔东北松桃地区冷泉碳酸盐岩的硫同位素对比
Fig. 3 Comparison of stable S isotopes from cold seep carbonates in the Datangpo of Songtao with those from others

冷泉口数据来源于 Greinet *et al.*, 2002; 其余数据来源于王家生等, 2005

岩,再向外则为黑色页岩);其次在这套碳酸盐岩中,具有强烈负偏的碳稳定同位素值,加之硫同位素表现出明显的正偏移,与现代天然气渗漏所形成的冷泉碳酸盐岩地球化学特征一致;三是具有特殊的沉积构造,特别是泥火山和底辟构造等特征,一系列泥火山向上开放的和填满锰质沉积物的垂直通道就是气体或流体逃逸的通道运移,在泥火山和底辟构造周围出现了菱锰矿和白云岩沉积物(周琦,1989).这与现代海底天然气水合物的分布、运移、渗漏,形成泥火山等冷泉喷口和底辟构造,并在泥火山口及其附近发生甲烷的氧化作用,形成自生碳酸盐,其原理是一致的.气孔应是当时甲烷渗漏过程中,采用气泡方式向上输送,气孔中的沥青就是封闭在碳酸盐岩中古甲烷演变而来.故 3 个方面的特征可充分证明,大塘坡组底部分布的菱锰矿、白云岩这套碳酸盐岩,是新元古代早期古海洋中天然气渗漏所形成的冷泉碳酸盐岩沉积.

值得说明的是,这里研究的冷泉碳酸盐岩与新元古代南沱组冰碛层之上的“盖帽”白云岩特征不完全一样,二者除同样具有明显的碳稳定同位素负偏移特征外,其他特征均明显不同:一是从分布特征上,如南沱组冰碛层(相当于 marinoan 冰期)之上(陡山沱组底部)的“盖帽”白云岩,全球广泛分布,十分稳定,形似“帽子”而得名(Hoffman and Schrag, 2002; Porter *et al.*, 2004);而大塘坡组底部的冷泉碳酸盐岩,分布零星,主要分布在一系列拉张盆地中,横向上、纵向上分布不连续,为丘状、透镜状等,

变化大,盆地中菱锰矿相变为白云岩后,再向外,很快过渡为正常的深水沉积;二是成因有分歧,即有“雪球地球”和冷泉成因 2 种观点.多数人认为“盖帽”白云岩是温室效应引起“雪球地球”融化后,由于大气和海洋水体中富含 CO_2 ,它们与海洋中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 发生快速反应,大量的 CaCO_3 和 MgCO_3 快速沉淀下来,形成分布全球的碳酸盐岩帽(Hoffman and Schrag, 2002);其次, Jiang *et al.* (2003)等提出,“盖帽”白云岩为甲烷源成因,但能否形成全球广布的“盖帽”白云岩还需进一步研究.而本地区的冷泉碳酸盐岩则是在特殊的大地构造位置上(被动陆缘裂谷盆地),甲烷渗漏形成冷泉,由于这时期正是 Rodinia 超大陆裂解阶段,在本地区形成一系列拉张盆地,并提供了大量可能来自深源的 Mn^{2+} ,在这一系列断陷盆地富集,与盆地中冷泉口提供的 CH_4 反应,形成碳酸锰沉淀.盆地边缘由于 Mn^{2+} 迅速减少, CH_4 便与 Mg^{2+} 及少量 Mn^{2+} 反应,形成含锰的白云岩或白云岩,这便是该地区碳酸锰矿及白云岩的成因.因此,该地区冷泉碳酸盐岩与南沱组冰碛层之上的“盖帽”白云岩成因和特征存在较大差异,二者不完全是一个概念.

目前依据“将今论古”的原理,通过对比现代海底天然气渗漏背景下的沉积物和特殊的沉积构造、碳、氧同位素、自生矿物和生物标志物等特征,来研究古天然气渗漏及其产物,进而评估其环境,特别是导致金属矿床形成的研究思路,具有较强的科学探索性和创新性.因此,大力开展地史时期天然气渗漏所导致的冷泉碳酸盐岩沉积、环境效应评价,特别是其成矿作用和机理的研究,来进行成矿预测具有时代紧迫性,特别是一些与古天然气成因相关联的层控或沉积的金属矿床的研究等,意义重大.其研究意义在于不仅扩大了天然气及水合物研究领域的时空范围,而且对其所导致的成岩成矿、环境评价和生物演化事件的分析研究提供了新思路.

References

Ballard R. D., 1984. The exploits of Alvin and Angus: Exploring the East Pacific Rise. *Oceanus* 27(3): 7–14.
Campbell, K. A., Farmer, J. D., Des Marais, D., 2002. Ancient hydrocarbon seeps from the Mesozoic convergent margin of California: Carbonate geochemistry, fluids and palaeoenvironments. *Geofluids* 2: 63–94.
Chen, D. F., Chen, X. P., Chen, G. Q., 2002. Geology and ge-

- ochemistry of cold seepage and venting-related carbonates. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(1): 34—40 (in Chinese with English abstract).
- Chen, D. F., Huang, Y. X., Feng, D., et al., 2005. Seep carbonate and preserved bacteria fossils in the northern of the South China Sea and their geological implications. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 24(3): 185—189 (in Chinese with English abstract).
- Feng, D., Chen, D. F., Su, Z., et al., 2005. Characteristics of cold seep carbonates and microbial processes in gas seep system. *Geoscience*, 19(1): 26—32 (in Chinese with English abstract).
- Greiner, J., Bollwerk, S. M., Derkachev, A., et al., 2002. Massive barite deposits and carbonate mine realization in the Derugin basin, Sea of Okhotsk: Precipitation processes at cold seep sites. *Earth and Planetary Science Letters*, 203: 165—180.
- Hinrichs K. U., Hayes J. M., Sylve S. P., et al., 1999. Methane-consuming archaeobacteria in marine sediments. *Nature*, 398: 802—805.
- Hinrichs K. U., Summons, R. E., Orphan, V., et al., 2000. Molecular and isotopic analysis of anaerobic methane-oxidizing communities in marine sediments. *Organic Geochemistry*, 31: 1685—1701.
- Hoffman, P. F., Schrag, D. P., 2002. The Snowball earth hypothesis: Testing the limits of global change. *Terra Nova*, 14: 129—155.
- Jiang, G. Q., Kennedy, M. J., Christie-Blick, N., 2003. Stable isotopic evidence for methane seeps in Neoproterozoic postglacial cap carbonates. *Nature*, 426: 822—826.
- Joye S. B., Boetius, A., Orcutt, B. N., et al., 2004. The anaerobic oxidation of methane and sulfate reduction in sediments from Gulf of Mexico cold seeps. *Chemical Geology*, 205: 239—251.
- Kulm, L. D., Suess, E., Moore, J. C., et al., 1986. Oregon subduction zone: Venting, fauna, and carbonates. *Science*, 231: 561—566.
- Lallenmand S. E., Glacon, G., Lauriat-Rage, A., et al., 1992. Seafloor manifestations of fluid seepage at the top of a 2 000 m deep ridge in the eastern Nankai accretionary wedge: Long lived venting and tectonic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 109: 333—346.
- Li, R. W., Zhang, S. K., Lei, J. J., et al., 1996. Temporal and special variation in $\delta^{34}\text{S}$ values of pyrite from Sinian discussion on relationship between Yangtze block and the Late Proterozoic supercontinent. *Scientia Geologica Sinica*, 31(3): 209—217 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. F., Wang, Q. S., Gao, X. J., 1989. Manganese deposits of Guizhou, China. Guizhou People's Press, Guiyang (in Chinese).
- Orange, D. L., Greene, H. G., Reed, D., et al., 1999. Widespread fluid expulsion on a translational continental margin: Mud volcanoes, fault zones, headless canyons, and organic-rich substrate in Monterey Bay, California. *Geological Society of America Bulletin*, 111(7): 992—1009.
- Orcutt, B. N., Boetius, A., Lugo, S. K., et al., 2004. Life at the edge of methane and sulfate reduction in sediments from Gulf of Mexico cold seeps. *Chemical Geology*, 205: 239—251.
- Pancost, R. D., Sinninghe Damste, J. S., Lint, S., et al., 2000. Biomarker evidence for widespread anaerobic oxidation in Mediterranean sediments by a consortium of methanogenic archaea and bacteria. *Applied Environmental Microbiology*, 66: 1126—1132.
- Peckmann, J., Reimer, A., Luth, U., et al., 2001. Methane-derived carbonates and authigenic pyrite from the northwestern Black Sea. *Marine Geology*, 177: 129—150.
- Peckmann, J., Thiel, V., 2004. Carbon cycling at ancient methane seeps. *Chemical Geology*, 205: 443—467.
- Porter, S. M., Knoll, A. H., Affaton, P., 2004. Chemostratigraph of Neoproterozoic cap carbonates from the Volta basin, West Africa. *Precambrian Research*, 130: 99—112.
- Sassen, R., Roberts, H. H., Carney, R., et al., 2004. Free hydrocarbon gas, gas hydrate, and authigenic mineral in chemosynthetic communities of the northern Gulf of Mexico continental slope: Relation to microbial processes. *Chemical Geology*, 205: 195—217.
- Wang, J., 2000. Neoproterozoic rifting history of South China: Significance to Rodinia break up. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Wang, J. S., Gan, H. Y., Wei, Q., et al., 2005. Stable isotopes of carbon and sulfur of cap dolomite in the Three Gorges and its mechanism discussion. *Geoscience*, 19(1): 15—20 (in Chinese with English abstract).
- Xie, Q. L., Chen, D. F., Chen, X. P., 1999. Characteristics of sedimentary organic matter in Songtao manganese deposits, Guizhou. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(2): 280—284 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. K., Li, A. C., Jiang, F. Q., et al., 2006. Paleoenvironments recorded in a new-type ferromanganese crust

- from the East Philippine Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(3): 301—308 (in Chinese with English abstract).
- Yin H. F., Wu, S. B., Du, Y. S., et al., 1999. South China defined as part of Tethyan archipelagic ocean system. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 24(1): 1—12 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C. L., Lanoil B., 2004. Geomicrobiology and biogeochemistry of gas hydrates and cold seeps. *Chemical Geology*, 205: 187—194.
- Zhou, Q., 1989. A preliminary discussion on the formation mechanism of ore pillows of Datangpo rhodochrosite deposit in Songtao County, Guizhou Province. *Geology of Guizhou*, 6(1): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Лєин, А.Ю., 2006. Cold methane seeps from the Black Sea and Norway Sea. Translated by Zhu, F. H.. *Marine Geology Letters*, 22(9): 25—26, 36 (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 陈多福, 陈先沛, 陈光谦, 2002. 冷泉流体沉积碳酸盐岩的地质地球化学特征. *沉积学报*, 20(1): 34—40.
- 陈多福, 黄永祥, 冯东, 等, 2005. 南海北部冷泉碳酸盐岩和石化微生物细菌及地质意义. *矿物岩石地球化学通报*, 24(3): 185—89.
- 冯东, 陈多福, 苏正, 等, 2005. 海底天然气渗漏系统微生物作用及冷泉碳酸盐岩的特征. *现代地质*, 19(1): 26—32.
- 李任伟, 张淑坤, 雷加锦, 等, 1996. 震旦纪地层黄铁矿硫同位素组成时—空变化特征及扬子地块与晚元古超大陆关系的论证. *地质科学*, 31(3): 209—217.
- 刘巽锋, 王庆生, 高兴基, 1989. 贵州锰矿地质. 贵阳: 贵州人民出版社.
- 王 剑, 2000. 华南新元古代裂谷盆地演化——兼论与 Rodinia 解体的关系. 北京: 地质出版社.
- 王家生, 甘华阳, 魏清, 等, 2005. 三峡“盖帽”白云岩的碳、硫同位素研究及其成因探讨. *现代地质*, 19(1): 15—20.
- 解启来, 陈多福, 陈先沛, 1999. 贵州松桃锰矿沉积有机质特征研究. *沉积学报*, 17(2): 280—284.
- 徐兆凯, 李安春, 蒋富青, 等, 2006. 东菲律宾新型富铁锰结壳的古海洋环境记录. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(3): 301—308.
- 殷鸿福, 吴顺宝, 杜远生, 等, 1999. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分. *地球科学——中国地质大学学报*, 24(1): 1—12.
- 周琦, 1989. 松桃大塘坡菱锰矿床矿枕形成机理初探. *贵州地质*, 6(1): 1—8.
- Лєин, А.Ю., 2006. 产自黑海和挪威海的冷甲烷渗透流. 朱佛宏译. *海洋地质动态*, 22(9): 25—26, 36.