

文章编号:1009-3850(2019)04-0065-06

柴达木盆地西部古近系石膏及其硫同位素分布特征

郑希民¹, 杨柳^{1,2}, 易定红¹, 王朴¹

(1. 中国石油勘探开发研究院西北分院, 甘肃 兰州 730020; 2. 中国石油大学, 北京 102249)

摘要:石膏是柴达木盆地油气圈闭的盖层之一。根据石膏层含量统计和石膏³⁴S_{V-CDT}分析,发现柴达木盆地古近系石膏主要分布于靠近阿尔金山的狮子沟凹陷和小梁山凹陷,石膏含量在垂向上具有旋回性。石膏的³⁴S_{V-CDT}值分布范围很大,为-23.3~71.4%,属国内外罕见。其原因是来自阿尔金山的硫酸盐³⁴S值很低,而由盆缘向盆内随着还原环境的强化,细菌的分馏作用逐渐强烈,导致³⁴S_{V-CDT}值的巨大差异。石膏³⁴S_{V-CDT}值的主控因素为硫酸盐³⁴S_{V-CDT}初始值、硫酸盐补给速率和还原菌分馏作用的强度。形成石膏的硫酸盐来自阿尔金山,经由狮子沟凹陷进入盆地,然后向盆地其它方向扩散。

关键词:柴达木盆地;石膏;硫同位素;古近系

中图分类号:P597+.2

文献标识码:A

1 概况

石膏(CaSO₄·2H₂O)和硬石膏(CaSO₄)是在被隔离的海洋、泻湖、盐湖等盐水中因蒸发作用沉淀形成的。在地质研究中,石膏层不仅是标志层,还有助于古地质地理环境、盐水浓度等方面的研究。石膏硫同位素比值(³⁴S/³²S_{V-CDT})对于分析硫的来源与沉积环境具有一定意义^[1],取得的共识主要有:(1)决定一个盆地水体和沉积物中硫同位素组成的主要因素是物源和细菌还原作用^[2];(2)硫酸盐中的重硫主要来源于早期蒸发岩,而轻硫则主要来源于黑色页岩的风化^[3];(3)细菌还原是导致硫同位素分馏最主要的原因,生物硫循环造就了自然界中最大的硫同位素分馏现象^[4];(4)硫同位素的分馏作用在开放的体系中相对稳定,在封闭体系的还原体系中SO₄²⁻的³⁴S增加^[5-6],高值硫同位素在湖相环

境条件下是有效的,对指示系统的开闭有重要的地质意义^[7]。由于硫元素的价态变化大(-2~+6),厌氧细菌对硫同位素的动力分馏效应大,因此对指示湖泊沉积环境的氧化还原条件开放程度具有较高的可信度^[8]。

柴达木盆地新生代咸化湖盆发育硫酸盐、碳酸盐和氯化物盐,其中硫酸盐以石膏和芒硝的形式赋存于多个层位,尤其在古近系最发育。前人对碳酸盐和氯化物盐的分布有过系统研究,对硫酸盐的分布研究尚属空白。有专家对盆地石膏硫同位素做过一些工作,发现盆地的石膏硫同位素变化值较大^[9]。

本文通过7口井的石膏层含量统计和4口井9个样品³⁴S_{V-CDT}实验数据(图1),结合前人的9个³⁴S_{V-CDT}实验数据^[10],总结了石膏的分布特征和³⁴S_{V-CDT}组合分布特征,探讨古近纪盐湖的沉积环境和硫酸盐来源。

收稿日期:2019-05-05; **改回日期:**2019-05-27

作者简介:郑希民(1962-),高级工程师,从事层序地质学、沉积学研究。

资助项目:中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“柴达木盆地建设高原大油气田勘探开发关键技术研究与应用”(编号:2016E-01)和国家科技专项“柴达木复杂构造区油气成藏、关键勘探技术与新领域目标优选”(编号:2016ZX05003-006)联合资助

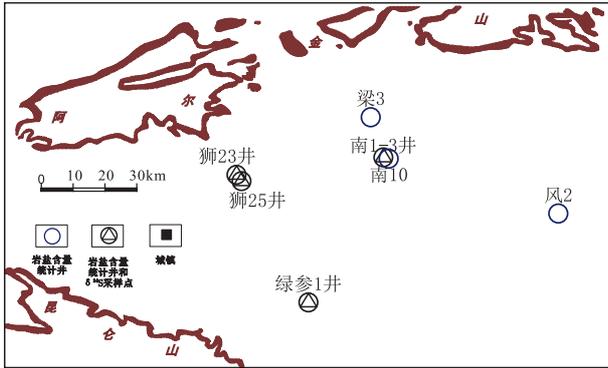


图1 岩盐含量统计井和 $\delta^{34}\text{S}$ 采样点分布图

Fig. 1 Distribution of well sites and sampling sites in this study in western Qaidam Basin

2 石膏分布特征

柴达木盆地西部古近系发育石膏岩、含石膏泥岩、石膏质泥岩和石膏质粉砂岩。目前所见的均为硬石膏。石膏岩主要与泥岩、砂质泥岩共生(图 2a),石膏质泥岩主要与泥岩、灰岩共生(图 2b),含石膏泥岩与泥岩呈互层(图 2c),石膏质砂岩与泥岩、灰质泥岩、石膏质泥岩共生(图 2d)。这些石膏岩及其组合显示出欠补偿的干旱盐湖特征,盐湖以硫酸盐为主,碳酸盐次之。

根据 7 口井的岩性录井和测井解释资料,统计了硫酸盐岩、碳酸盐岩和氯化物盐岩的相对含量,

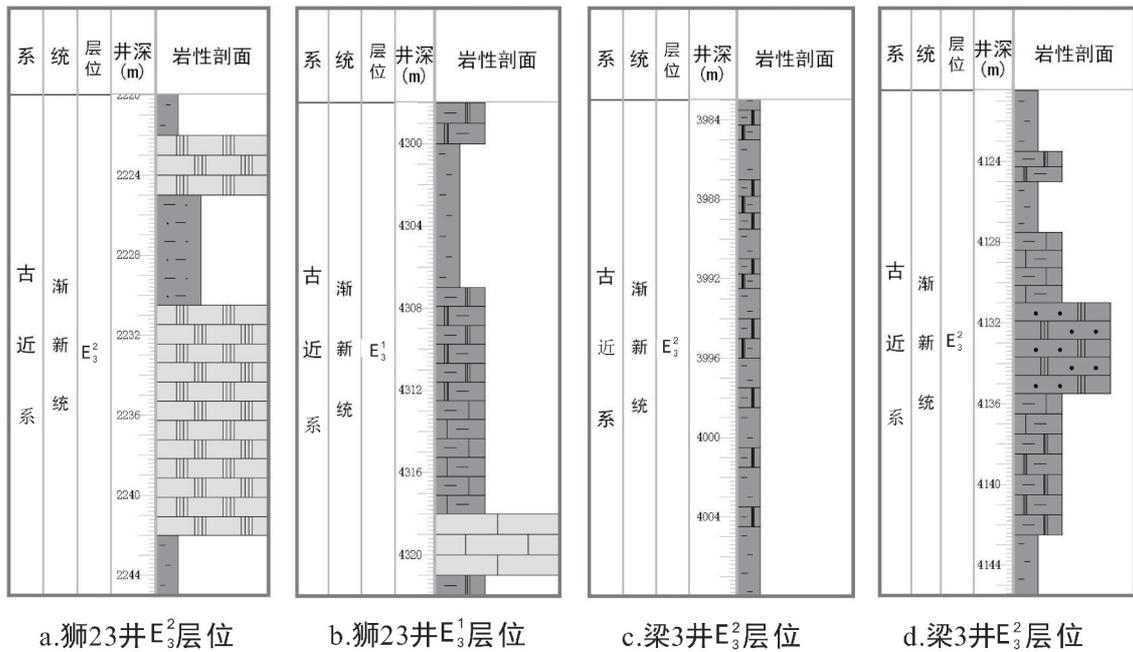


图2 柴达木盆地西部古近系石膏及岩石组合岩性柱状图

Fig. 2 Columns of individual wells showing the distribution of gypsum and associated rock associations in the Palaeogene strata in western Qaidam Basin

硫酸盐大部分为硬石膏,少量芒硝;碳酸盐岩以泥灰岩为主,其次为钙质泥岩和钙质粉砂岩;氯化物盐岩均为氯化钠盐岩(图 3)。

狮 23 井和狮 25 井石膏岩最发育,其中狮 25 井的石膏岩从下向上发育得最连续,从 E_{1+2} 到 N_1 ,硫酸盐岩的百分比含量分别为 26.20%、19.14%、13.55%、5.80%,平均值为 15.32%;狮 23 井 E_3^2 石膏岩含量最大,高达 65.26%;梁 3 井,从 E_3^1 到 N_1 ,硫酸盐岩的百分比含量分别为 0%、25.75%、

5.00%,平均值为 14.90%;南 1-3 井,从 E_3^2 到 N_1 ,硫酸盐岩的百分比含量分别为 0%、6.42%,平均值为 2.09%;绿参 1 井仅在 N_1 有 0.26% 的硫酸盐岩。风 2 井和南 10 井只含有碳酸盐岩,不含硫酸盐岩。

硫酸盐岩集中分布于 E_{1+2} 和 E_3^2 两个层位,在古近系形成 $E_{1+2} \sim E_3^1$ 和 $E_3^2 \sim N_1$ 两大旋回。在 $E_{1+2} \sim E_3^1$ 旋回硫酸盐岩分布范围小,呈硫酸盐岩和碳酸盐岩互为消长的组合特点;在 $E_3^2 \sim N_1$ 旋回,硫酸盐岩集中分布于 E_3^2 ,分布范围很广,在 N_1 几乎

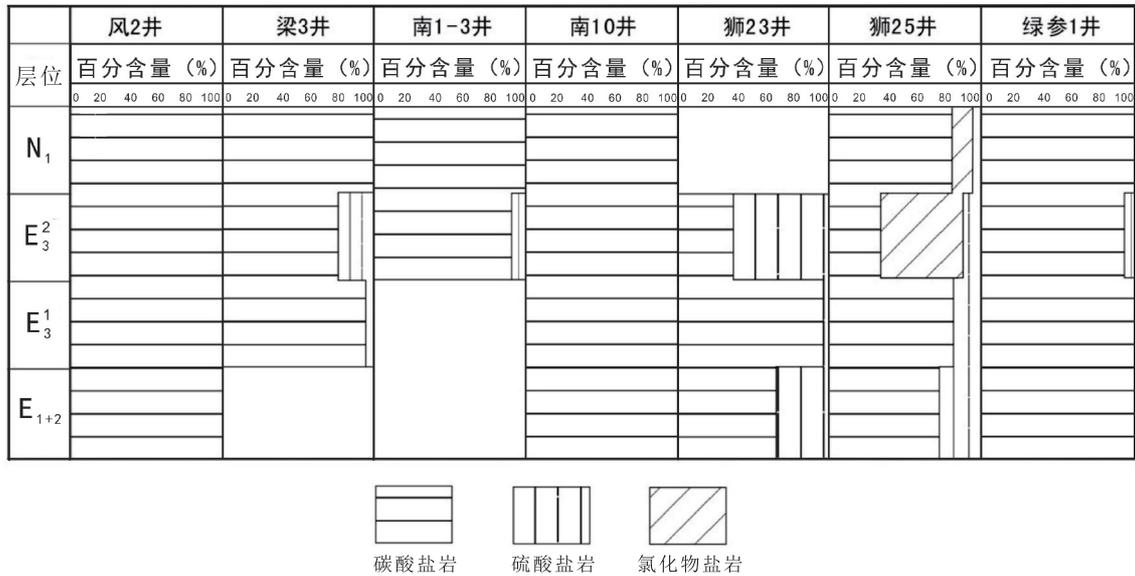


图3 柴达木盆地西部古近纪三大盐类分布统计表

Fig. 3 Statistics of the contents of carbonate rocks, sulfate rocks and chloride rocks in the Palaeogene strata in western Qaidam Basin

消失,在旋回内有氯化物盐岩加入。硫酸盐岩有两个分布中心,最主要的中心位于狮23井、狮25井及其附近,另一个位于梁3井及其附近,这两个硫酸盐岩分布中心均位于阿尔金山前,其含量向盆地内部逐渐降低。

3 石膏的³⁴S_{V-CDT}值特征

3.1 石膏的³⁴S_{V-CDT}值变化范围

Sakai (1986)指出,温度25℃时,溶解的SO₄²⁻与沉淀硫酸盐之间硫同位素分馏系数很小^[15]。世界其它一些盆地中现代石膏结晶作用中硫的同位素分馏作用也非常弱,说明硫酸盐的硫同位素比值可以代表古湖水或海水的硫同位素比值,因而可以从现代蒸发岩的硫酸盐同位素来判断古环境^[10-11]。

现代海洋硫酸盐及海相成因蒸发岩的³⁴S值约为19‰~24.3‰,多在21‰左右^[12],现代海相蒸发岩与海水中的硫酸盐³⁴S相似。西藏现代盐湖和青海柴达木盆地尕斯盐湖的³⁴S值较稳定,分别为3‰~8‰和11‰~14‰。东濮凹陷和济阳凹陷古盐湖的³⁴S值分布范围较大,分别为14‰~41‰、3‰~32‰,这些陆相古盐湖的³⁴S值分布范围比其它盐湖或者海洋相对较大(图4)。

柴达木盆地古近纪石膏的³⁴S_{V-CDT}值变化从-23.3‰到71.4‰(表1),其变化范围之大,在古今盐湖及海洋蒸发岩里实属罕见(图4),反映出这个

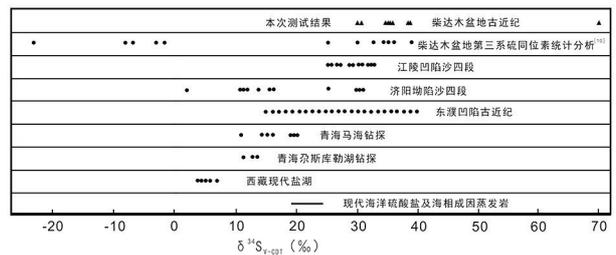


图4 我国现代盐湖、海洋及蒸发岩的³⁴S对比^[6,10]

Fig. 4 Comparison of sulfur isotope values (³⁴S) in modern salt lakes, oceans and evaporates in China

古盐湖具有独特的硫酸盐补给条件和沉积环境。

柴达木盆地红狮洼陷古近纪的³⁴S_{V-CDT}值为-23.3‰~35.5‰,主要集中在29‰~36‰。小梁山洼陷古近纪的³⁴S_{V-CDT}值为-7.2‰~40.5‰,主要集中在35‰~41‰。这两个凹陷的³⁴S_{V-CDT}值集中分布于29‰~41‰,与东濮凹陷和济阳凹陷的右侧重叠,具有相似性。对于柴达木盆地古近系³⁴S_{V-CDT}的最小值和最大值异常,初步认为出现最小值或者为负值,与硫酸盐的来源有关。其可能来源于³⁴S含量很少的硫化物氧化,也可能来源于黑色页岩风化产物时则相对富集轻的硫同位素成分^[3],例如贵州上二叠统的煤系地层硫同位素基本为负值,最低可达-12‰^[13];塔里木盆地上奥陶统泥灰岩干酪根硫同位素值为-3.1‰~0.86‰^[14]。扎哈泉洼陷绿参1井

的 $^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值高达71.4‰,初步判断这个凹陷为非常封闭的还原环境,大量的生物对硫同位素产生了强烈的分馏作用。

表1 柴达木盆地第三系硫同位素分析统计

Table 1 Statistics of the $^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ values for the gypsum in the Palaeogene and Neogene strata in western Qaidam Basin

注陷	原样号	采样深度 (m)	采样 层位	样品 名称	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ (‰)
	* 狮25井-2	4007	E_3^2	硬石膏	32.3
	* SH25-S-1	4191.7	E_3^1	石膏	34.1
	* SH23-S-3	4010.5	E_3^1	石膏	30.2
	* SH23-S-2	4168	E_3^1	石膏	31.3
	* SH23-S-4	4172	E_3^1	石膏	34.8
红狮	* SH23-S-5	5512	E_{1+2}	石膏	35.4
注陷	* 狮23井-1	4014	E_3^1	硬石膏	26.5
	* 狮23井-2	5515.94	E_{1+2}	硬石膏	29.7
	* 狮12井-1	3301.2	E_3^2	硬石膏	35.5
	* 狮12井-2	3356.3	E_3^2	硬石膏	35.1
	* 七心1井-3	972.31	E_3^2	硬石膏	-23.3
	* 七心1井-6	986.47	E_3^2	硬石膏	-3.5
	* 七心1井-8	1054	E_3^2	硬石膏	-8.6
	* N1-3-T-3	3003.3	E_3^2	石膏	35.4
小梁山	* N1-3-T-2	3053.8	E_3^2	石膏	39.0
注陷	* N1-3-T-1	3062.5	E_3^2	石膏	39.2
	* 咸7井-6	1691.75	E_3^2	硬石膏	36.0
扎哈泉	* LC1-T-2	4729.5	E_3^2	石膏	71.4
注陷					

※代表本次实测数据, * 引用文献^[10]

3.2 石膏 $^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值的垂向变化

根据本次硫同位素测试结果,南1-3井的3个样品和狮23井的4个样品都显示由下向上 ^{34}S 值逐渐减小的特征(图5)。决定一个盆地水体和沉积物中硫同位素的组成有两个重要因素:一是硫的来源,二是盆地内发生的生物分馏作用^[2]。根据这个原理判断,在沉积过程中,当低 ^{34}S 值的硫酸盐补给速率大于生物分馏速率时,就会出现 ^{34}S 值由下向上逐渐减小的情况。因为进入盆地的硫酸盐中重硫同位素 ^{34}S 相对含量较低,轻硫同位素 ^{32}S 相对含量较高,其 ^{34}S 值偏低。如果生物分馏作用较快、超过未被分馏的硫的补给量时,会使 ^{34}S 值相对变大,这种情况发生在图5的下部层位,指示相对封闭的沉积环境;反之,当新进入的硫含量超过被生物分馏的

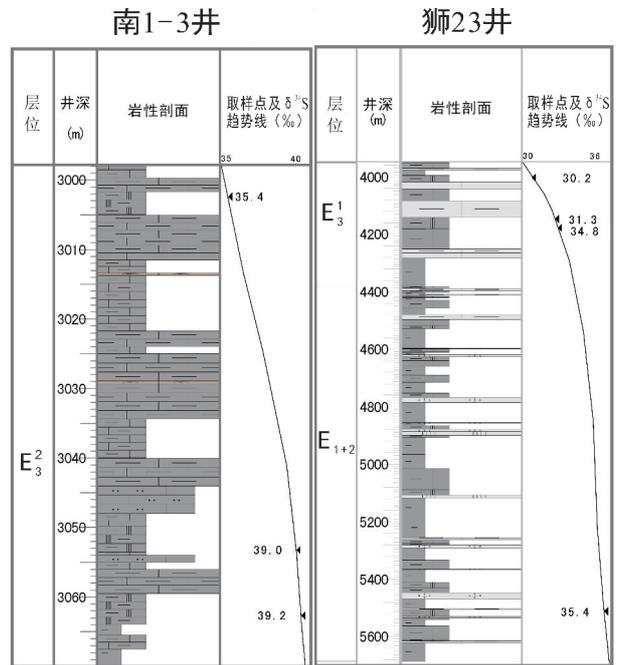


图5 硫同位素的垂向分布

Fig. 5 Vertical variations of the sulfur isotope values (^{34}S) in the Shi-23 well and Nan 1-3 well in western Qaidam Basin

硫含量, ^{34}S 值不会明显变大,这种情况发生在图5的上部层位,指示相对开放的沉积环境。整体而言,柴达木盆地古近纪从 E_{1+2} 到 E_3 沉积环境由相对封闭变成相对开放。

3.3 石膏 $^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值的横向变化

本文根据柴达木盆地古近系下干柴沟组(E_3)的 ^{34}S 数据绘成等值线图(图6)。由图6可见,在七心1井 ^{34}S 值最小,为-11.8‰,以该井为中心向盆地方向呈扇形分布, ^{34}S 值逐渐增大,绿参1井高达71.4‰。

根据 ^{34}S 等值线图可以划分为3个数量区,低值区为-11.8‰~20‰,中值区为20‰~40‰,高值区为40‰~71.4‰。

以七心1井为代表的 ^{34}S 低值区靠近盆缘, ^{34}S 值小的原因有两个:一是来自物源的硫酸盐 ^{34}S 值本身很低;二是这里不断接受物源,水体的氧化程度较高,厌氧细菌很难生存,几乎不发生生物分馏作用。

向盆地内部,随着湖水加深,生物还原作用以及细菌对硫同位素的分馏作用加强,导致 ^{34}S 值增大,进入以狮12、狮23、狮25、咸7和南1-3等井为代表的 ^{34}S 中值区。该区 ^{34}S 分布区间为26.5‰~39.2‰,

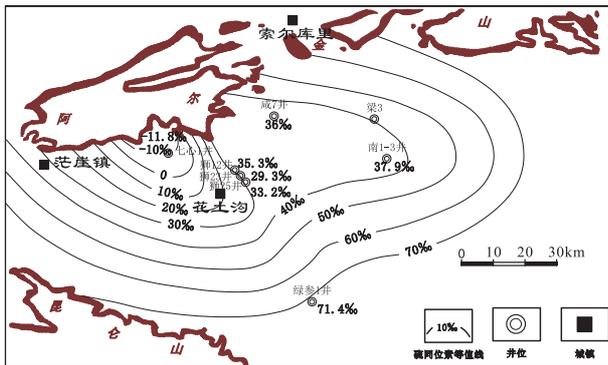


图6 柴达木盆地西部下干柴沟组硫同位素等值线图

Fig.6 Contour map of the sulfur isotope values (^{34}S) in the Xiaganchaigou Formation, western Qaidam Basin

平均为35‰,这是盆地 ^{34}S 分布的主体。另外,咸7井也靠近盆缘,但是其 ^{34}S 值可达36‰,判断其硫酸盐的供给不是来自附近,而是由狮子沟地区扩散过去的,显示出硫酸盐经由七心1井-狮子沟进入盆地,这也是狮子沟地区石膏最发育的主因。

^{34}S 高值区靠近盆地中心,强烈的生物还原作用和细菌对硫同位素分馏作用,造成绿参1井的 ^{34}S 值极高。根据 ^{34}S 值分布趋势判断,这里的硫酸盐依然来自阿尔金山。

4 结论

(1)柴达木盆地古近系石膏主要分布于靠近阿尔金山的狮子沟凹陷和小梁山凹陷,石膏含量在垂向上有旋回性。硫酸盐来自阿尔金山,经由七心1井-狮子沟地区注入盆地。

(2)柴达木盆地古近纪陆相盐湖的 $^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值分布范围很大,为-23.3‰~71.4‰。其成因是注入的硫酸盐 ^{34}S 值自身较低并且仅受到很弱的生物分馏作用。向盆地内部,细菌分馏作用逐渐强烈,导致 ^{34}S 值很大。

(3)研究区石膏的 $^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值受控于3个因素,即注入的硫酸盐 $^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 初始值、硫酸盐的补给速率和还原菌分馏作用的强度。

参考文献:

- [1] 魏菊英. 同位素地球化学[M]. 北京:地质出版社,1988. 23-80.
- [2] 李任伟,辛茂安. 东濮盆地蒸发岩的成因[J]. 沉积学报,1989, 7(4):141-147.
- [3] 王国栋,程日辉,于民凤,等. 沉积物的矿物和地球化学特征与盆地构造、古气候背景[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2006, 36(2):202-206.
- [4] Faure G. Principle of Isotope Geology [M]. New York: John Wiley & Sons,1986. 117-199.
- [5] 郑永飞,陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京:科学出版社,2000. 1-278.
- [6] 陈道公,支霞臣,杨海涛. 地球化学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1994. 98-111.
- [7] 王春连,刘成林,徐海明,等. 湖北江陵凹陷古新统沙市组四段硫酸盐硫同位素组成及其地质意义[J], 吉林大学学报(地球科学版),2013,43(3):691-703.
- [8] 谭红兵,于升松. 我国湖泊沉积环境演变研究中元素地球化学的应用现状及发展方向[J]. 盐湖研究,1999,7(3):58-65.
- [9] 彭立才,杨平,濮人龙. 陆相咸化湖泊沉积硫酸盐岩硫同位素组成及其地质意义[J], 矿物岩石地球化学通报,1999,7(2):99-102.
- [10] 赵加凡,陈小宏,金龙. 柴达木盆地第三纪盐湖沉积环境分析[J], 西北大学学报(自然科学版),2005,35(3):342-346.
- [11] 史忠生,陈开远,石万忠. 东濮盐湖下第三系硫酸盐硫同位素组成分析[A]. 在汉部委属高校首届博士研究生联合论坛优秀论文集:资源、能源、环境与可持续发展类[C]. 武汉:中国地质大学出版社,2009. 51-57.
- [12] 史忠生,陈开远,史军,等. 东濮盐湖古近系硫酸盐硫同位素组成及地质意义[J]. 石油勘探与开发,2004,31(6):44-46.
- [13] 洪业汤,张鸿斌,朱詠焯,等. 中国煤的硫同位素组成特征及燃煤过程硫同位素分馏[J]. 中国科学(B辑),1992,(8):868-873.
- [14] 蔡春芳,李开开,邬光辉,等. 硫同位素作为塔里木盆地油源对比和热化学硫酸盐还原作用的标志[A]. 第十一届全国有机地球化学学术会议论文摘要汇编[C]. 昆明:第十一届全国有机地球化学学术会议,2007. 127-128.
- [15] Uyama F, Chiba H, Kusakabe M, Sakai H. Experimental details of sulfur isotope exchange reactions in the $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ - H_2S - SO_4^{2-} system at hydrothermal temperatures [M]. Misosa, Tottoriken: Okayama Univ., 1985.

Distribution of gypsum and sulfur isotopes in the Palaeogene strata, western Qaidam Basin, Qinghai

ZHENG Ximin¹, YANG Liu^{1,2}, YI Dinghong¹, WANG Pu¹

(1. *Northwestern Branch, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Lanzhou 730020, Gansu, China*; 2. *China University of Petroleum, Beijing 102249, China*)

Abstract: The gypsoliths occur as part of the cap rocks of the oil and gas traps in the Qaidam Basin, Qinghai. In the light of the statistics of gypsum contents and $^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ values, the gypsum in the Palaeogene strata mainly occurs in the Shizigou depression and Xiaoliangshan depression near the Altun Mountains. Vertically, the gypsum contents display the cyclic distribution. The $^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ values show a rarely wide range of -23.3% to 71.4%. The initial ^{34}S values are very low in the Altun Mountains. The increase of the reducing conditions and the fractionation of bacteria towards the Qaidam Basin leads to the great differences in the $^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ values. The main controlling factors include the initial $^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ values, supply rates of sulfates, and intensity of bacteria fractionation. It follows that the sulfates are derived from the Altun Mountains, and then enter into the Qaidam Basin through the Shizigou depression. The results of research in this study may be helpful to the study of the gypsum distribution, sedimentary environments of the Palaeogene salt lakes, and sulfate origins in the study area.

Key words: Qaidam Basin; gypsum; sulfur isotope; Palaeogene

上接第(64页)

The discovery and significance of the fossils from the Early Precambrian strata in the Yimen region, central Yunnan

LIU Junping¹, LI Jing¹, WANG Wei¹, SUN Baidong¹, ZENG Wentao², SONG Donghu¹, GUAN Xueqing¹, LU Boye¹, HAO Xuefeng¹, SUN Peng¹

(1. *Yunnan Institute of Geological Survey, Kunming 650216, Yunnan, China*; 2. *Research Institute of Environmental Monitoring, Kunming 650216, Yunnan, China*)

Abstract: The Palaeoproterozoic Yimen Group including six formations was established during the 1:50 000 regional geological survey in the last years in the Yimen region, central Yunnan. The abundant well-preserved macroscopic multicellular fossils were successively found in the greyish dark carbonaceous-muddy slates in the Liangshan Formation and the dark grey muddy limestones in the Yongjingshao Formation in the Yimen Group. The macroscopic multicellular fossils 20 cm in length were also found in the grayish purple muddy slates in the Meidang Formation in the Mesoproterozoic Kunyang Group. The microprobe and scanning electron microscopy analysis indicates that the compositions of the fossils collected from the above-mentioned Formations consist dominantly of the elements carbon, oxygen and phosphorus. The discovery will fill the fossil-free gaps in the Early Precambrian strata in Yunnan, and also will be important to the study of the early history of the Earth and life evolution.

Key words: Yimen region in central Yunnan; Yimen Group; Kunyang Group; macroscopic multicellular fossil; early life evolution