

新元古代—寒武纪硫同位素异常事件 (Yudomski 事件)的起源与结束

张智礼¹, 孟凡巍², 倪培³, 李慧莉¹, 卓勤功^{4,5}

- (1. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083;
2. 中国科学院南京地质古生物研究所, 现代古生物学和地层学国家重点实验室, 江苏 南京 210008;
3. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 201193; 4. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;
5. 中国石油集团盆地构造与油气成藏重点实验室, 北京 100083)

摘要: 新元古代晚期—寒武纪早期是地球历史演化的关键时期, 整个生物圈、大气圈和水圈在此期间都发生了巨大的变化, 海水成分在其间也发生了明显的变化。而石盐流体包裹体恰恰记录了该时段海水主要离子成分的转变: 海水成分从新元古代晚期的“文石海”, 快速转化为寒武纪的“方解石海”; 同时海水中的碳、锶、硫同位素都发生了剧烈的改变, 其中海水硫酸根的硫同位素从新元古代冰期前的 20‰ 左右, 迅速升高到新元古代冰期后的 35‰ 左右, 甚至可以到 45‰, 海相蒸发岩沉积中的硫酸盐沉积(主要是石膏、硬石膏)则直接记录了当时海水中硫酸根的硫同位素变化。现有研究表明, 新元古代晚期——寒武纪时期的海相蒸发岩沉积记录了当时海洋中存在着地质历史时期最大的硫同位素异常, 即“Yudomski 事件”。塔里木盆地的寒武纪早期、中期蒸发岩记录了“Yudomski 事件”的硫同位素异常高值(35‰ 左右, 甚至更高), 表明这一起源于新元古代晚期的同位素异常事件持续到了寒武纪的早期和中期; 塔里木盆地奥陶纪早期的蒸发岩、鄂尔多斯盆地奥陶纪中期蒸发岩和美国 Williston 盆地奥陶纪晚期地层的蒸发岩的硫同位素数据相似, 都在 +25‰ 左右则记录了较低的海洋硫同位素值, 表明起源于新元古代冰期之后的“Yudomski 事件”的硫同位素异常, 持续到了寒武纪的中期, 而结束于寒武纪的晚期。

关键词: 新元古代; 寒武纪; 石膏; 硫同位素; Yudomski 事件

中图分类号: P534

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2020)04-0022-07

1 “Yudomski”事件: 新元古代冰期后 全球海洋硫酸根 $\delta^{34}\text{S}$ 的突然上升

新元古代晚期到寒武纪早期是地球历史上从单细胞生物向多细胞生物演化、后生动物起源的关键时期, 整个生物圈的组成、大气圈和水圈的成分都发生了巨大的变化^[1-6]。海水中的同位素成分也发生了明显的变化, 其中碳同位素信息被记录在碳酸盐沉积中; 而硫酸盐沉积过程中几乎不发生分馏, 因此可以直接记录当时海水硫同位素的组成特征^[7-8]。海洋和盐湖硫酸盐的沉积可以

直接记录水体中的硫酸根的硫同位素变化特征^[9-10]; 因此石膏、硬石膏和重晶石中的硫同位素可以直接反映当时海水/湖水中的硫同位素组成特征。地质记录中最广泛分布的硫酸盐沉积矿物以石膏和硬石膏为主, 其次是重晶石(硫酸钡沉积)。石膏和硬石膏可以被溶解再沉淀, 然而其硫同位素组成并不发生明显的改变^[7], 并且石膏角砾岩的硫同位素都可以记录当时卤水中的硫酸根的硫同位素组成特征。在对蒸发岩盆地的硫同位素研究时, 因为在蒸发岩段很少取芯, 因此可以通过对泥浆带上的岩屑进行双目镜下的分选, 选取石膏/硬石膏岩屑进行硫同位素的分析。因此, 可以通过石油钻井取芯(相对较少)以及岩

收稿日期: 2020-09-08; 修回日期: 2020-10-19

基金项目: 国家自然科学基金(41672142; 41561144009)与中国科学院基础前沿科学研究计划(ZDBS-LY-DQC021)

作者简介: 张智礼(1980-), 男, 博士, 高级工程师。主要从事石油与天然气地质研究。

通信作者: 孟凡巍(1977-), 男, 副研究员。主要从事古环境与古生物方面的研究。Email: mfw2010@126.com。

屑样品中的海相石膏,来获取不同地质时代海水的硫同位素。

蒸发岩沉积很难通过生物地层来确定时代,因为由于盐度的升高蒸发岩地层通常缺乏宏体化石。蒸发岩地层也很难进行放射性同位素定年来确定时代^[11-12],因此蒸发岩地层的定年通常是通过与蒸发岩互层的泥岩中的微体化石的提取、结合蒸发岩互层的火山岩的定年来确定时代。而塔里木盆地的蒸发岩通常与碳酸盐岩交替出现^[13],因此可以通过连续的碳同位素曲线来划分出蒸发岩的沉积时代,从而建立该盆地不同时代的硫同位素变化序列^[14-15]。

现代海水硫酸根的硫同位素主要是 20‰ 左右,而且这一数据十分均一^[16]。在地质历史时期,海水的 $\delta^{34}\text{S}$ 数据大部分地质时代在 15‰ 到 20‰ 之间左右波动(图 1),但是全球海水硫同位素曲线在长期稳定的大背景下却可以产生短期的硫同位素值的升高,可以识别出三个主要的地质事件。硫同位素的剧烈变化表明在极短的地质时间内(几十个百万年内)大量的硫化物从海水中沉淀出来,使海水中的硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 急剧升高。以前的地质模式提出:蒸发岩蒸发产生的卤水沉积在地中海型的深水盆地中,在卤水之下黄铁矿大量沉淀导致卤水中富含 $\delta^{34}\text{S}$,而相应的硫酸根中 $\delta^{18}\text{O}$ 也会升高。由于存储盆地的破坏,导致深层卤水和表面海水的混合,导致世界范围内的蒸发岩硫同位素曲线的剧烈变化。Holser^[17-18]首次提出,新元古代晚期海水 $\delta^{34}\text{S}$ 值的快速升高需要及其特殊的条件,并根据西伯利亚新元古代地层的沉积,将这一硫同位素值快速事件定义为“Yudomski 事件”(Yudomski event)。Holser^[16-17]推测在分层卤水环境下,表层密度较小卤水与下层高浓度卤水隔绝,由于细菌还原作用使深处卤水逐渐富集 $\delta^{34}\text{S}$ 。随后发生了海水的倒转,使深部的卤水与开阔海的海水的迅速混合,造成了全球开阔海环境下蒸发岩记录的海水硫酸盐的硫同位素异常高值事件——“Yudomski 事件”。

此外,在生物地层限制非常好的云南寒武纪—前寒武纪界线上,同样出现了硫同位素正异常^[19]。因此,前人的研究认为,这个硫同位素的正异常在新元古代冰期之后出现,并持续到了寒武纪的早—中期。在西伯利亚的蒸发岩中,新元

古代晚期的硫同位素正异常事件记录一直持续到了寒武纪的早中期,在寒武纪中期的石膏中仍然保持很高的硫同位素正异常^[10]。要研究“Yudomski 事件”的影响范围,需要全球硫酸盐蒸发岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 数据,收集来自世界各地同时期不同蒸发岩盆地的样品来进行对比。因此,Peryt 等^[20]分析了西伯利亚东部寒武纪早期的石膏硫同位素;而孟凡巍等^[21]分析了塔里木盆地寒武纪早期和中期的石膏硫同位素。

2 “Yudomski”事件的出现与结束:来自塔里木盆地的记录

孟凡巍等^[22]对塔里木盆地 ZS-5 井早寒武世到中寒武世的硬石膏样品进行了连续采样,并进行了硫酸盐岩的硫、氧同位素分析;同时还收集了塔里木盆地奥陶纪早期的石膏硫同位素数据^[23],以及陕北鄂尔多斯盆地奥陶纪中期的石膏硫同位素数据^[11]。通过对塔里木寒武纪早期、中期和奥陶纪早期的石膏硫同位素分析,发现起源于新元古代晚期的“Yudomski”事件的石膏硫同位素异常高值,在塔里木寒武纪早期、中期的石膏中仍然很高,表明这一事件一直持续到了寒武纪中期,而以前发表的数据大部分发现新元古代晚期—寒武纪早期^[10,16-17],以前估计这一事件大

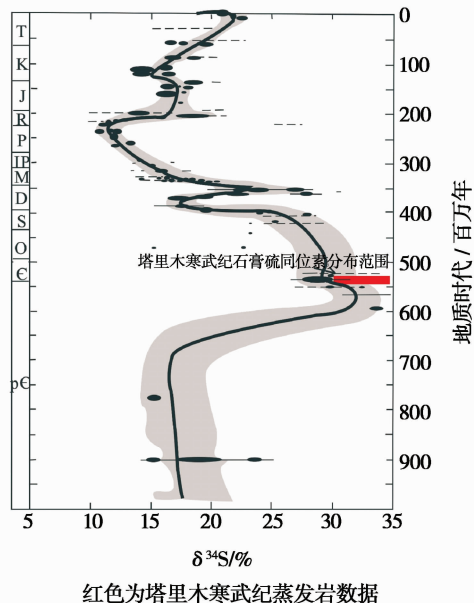


图 1 地质时期的硫酸盐硫同位素曲线^[21]

Fig. 1 Sulfur isotope curves of sulfate in geological period

致延续到寒武纪早期,现在的结果发现该事件可以持续到寒武纪中期。奥陶纪早期石膏的硫同位

素则显著降低,表示这一事件在奥陶纪早期已经结束(图 1,表 1)。

表 1 塔里木盆地寒武纪早期—中期硫酸盐岩的硫氧同位素数据

Table 1 Sulfur-oxygen isotope data of early-medium Cambrian sulfate rocks in Tarim Basin

样品顺序	井 号	样 品	深度/m	组 名	岩 性	$\delta^{34}\text{S}/(\text{‰}, \text{CDT})$	$\delta^{18}\text{O}$
1	ZS-5	ZS-5-3	6 191	阿瓦塔格组	硬石膏	34.7	15.7
2	ZS-5	ZS-5-4-1	6 193	阿瓦塔格组	硬石膏	32.9	6.6
3	ZS-5	ZS-5-4-2	6 193	阿瓦塔格组	硬石膏	32.6	13.9
4	ZS-5	ZS-5-5	6 197	阿瓦塔格组	硬石膏	34.8	14.7
5	ZS-5	ZS-5-6	6 199	阿瓦塔格组	硬石膏	33.1	14.0
6	ZS-5	ZS-5-7	6 220.5	阿瓦塔格组	硬石膏	30.7	14.5
7	ZS-5	ZS-5-8	6 222	阿瓦塔格组	硬石膏	30.8	13.1
8	ZS-5	ZS-5-9	6 224	阿瓦塔格组	硬石膏	31.1	7.7
9	ZS-5	ZS-5-12	6 554	吾松格尔组	硬石膏	30.2	13.3
10	ZS-5	ZS-5-13	6 556	吾松格尔组	硬石膏	30.8	13.3
11	ZS-5 1	ZS-5-14	6 558.5	吾松格尔组	硬石膏	31.2	13.1
12	ZS-5	ZS-5-16	6 598	吾松格尔组	硬石膏	31.4	13.5

奥陶纪蒸发岩在地质历史中分布极为罕见,只有在中国鄂尔多斯盆地才分布有巨厚的奥陶纪蒸发岩沉积。而孟凡巍等^[22]通过碳同位素地层的对比,可以得知这些蒸发岩沉积在奥陶纪中期;在塔里木盆地则存在奥陶纪早期的石膏沉积^[23]。对其硫同位素的分析发现,该时期硫同位素已经降到了 25‰左右了(图 2)。新的数据使我们对“Yudomski”事件有了更清楚的认识,这些数据表明“Yudomski”事件不但是一个全球性的事件,而且一直延续到了寒武纪的中期,直到寒武纪的晚期才结束。具体的结束时间大致在寒武纪晚期,还需要未来寻找寒武纪晚期地层的蒸发岩来进行证实。而在寒武纪晚期之后,根据塔里木盆地奥陶纪早期蒸发岩的记录海水的硫酸根的 $\delta^{34}\text{S}$ 已经下降到了 25‰左右(+26.1‰)^[22-23];鄂尔多斯盆地奥陶纪中期蒸发岩记录海水的硫酸根的 $\delta^{34}\text{S}$ 却略有上升,平均值达到了 27.7‰^[22];美国 Williston 盆地奥陶纪晚期地层的蒸发岩记录海水的硫酸根的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值 25.5‰^[24](图 3,表 2)。整个奥陶纪的海水硫同位素在 25‰(奥陶纪早期

和晚期)到 27.7‰之间(奥陶纪中期)波动,因此奥陶纪其间海水硫同位素基本变化不大。

海水在三叠纪之后基本退出中国大陆,因此在中国东部和西部在白垩纪第三纪之间分布了许多非海相的蒸发岩盆地^[25];对其中的硫同位素的研究可以识别出海侵或者是非海侵的迹象。值得指出的是,在全球范围内海相盆地的新元古代—寒武纪地层中出现了许多硫同位素的异常高值,这些数据是由于“Yudomski”事件造成的。例如印度 Nagaur-Bikaner-SriGanganagar 盆地的 Hanseran 组蒸发岩、西伯利亚新元古代末期、寒武纪早期—中期的蒸发岩^[26]、伊朗新元古代末期、寒武纪早期 Hormuz 组与 Desu 岩系的蒸发岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 的数值都在 +30.0‰左右^[27],达到了地质历史中的最高值。硫同位素数值此后在大部分地质历史时期都在 +20.0‰左右波动,但是在泥盆纪晚期、三叠纪早期也分别出现了硫同位素异常升高的事件,分别被命名为“Souris”事件与“Röt”事件,但是数值的大小和持续时间,都无法与“Yudomski”事件相比(图 4);在二叠纪时期,硫同位素数值达

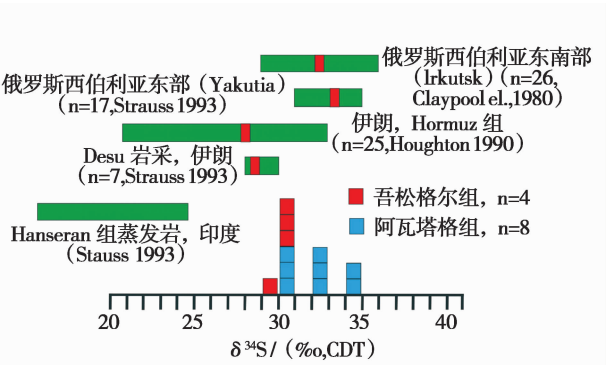


图2 “Yudomski”事件塔里木盆地与其它同时期盆地的硫酸盐沉积的硫同位素数值

Fig. 2 Sulfate isotopic values of sulfate deposits in the Tarim Basin and other basins in the “Yudomski” Event

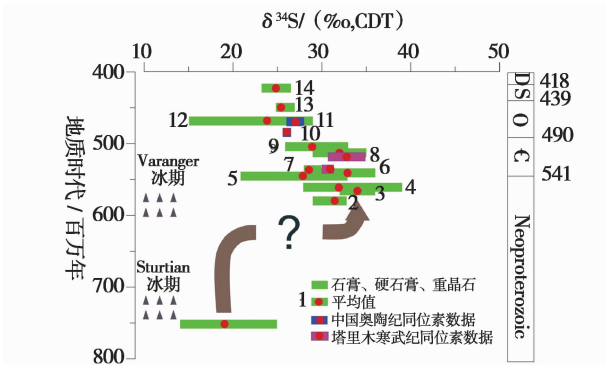


图3 “Yudomski”事件前后的硫酸盐硫同位素变化

Fig. 3 Changes of Sulfur isotopes of Sulfate before and after “Yudomski” events

表2 寒武纪与奥陶纪的硫酸盐岩硫同位素数据
Table 2 Sulfate isotope data of Cambrian and Ordovician sulfate rocks

盆地	地质时代	井号	样品深度/m	岩性	$\delta^{34}\text{S}/(\text{CDT})/\text{‰}$	平均值/ (‰, CDT)
塔里木盆地	寒武纪早期	ZS-5	6 598	硬石膏	+31.4	+30.9 (Meng 等, 2019)
		ZS-5	6 558.5	硬石膏	+31.2	
		ZS-5	6 556	硬石膏	+30.8	
		ZS-5	6 554	硬石膏	+30.2	
		ZS-5	6 224	硬石膏	+31.1	
		ZS-5	6 222	硬石膏	+30.8	
	寒武纪中期	ZS-5	6 220.5	硬石膏	+30.7	+32.6 (Meng 等, 2019)
		ZS-5	6 199	硬石膏	+33.1	
		ZS-5	6 197	硬石膏	+34.8	
		ZS-5	6 193	硬石膏	+32.6	
		ZS-5	6 193	硬石膏	+32.9	
		ZS-5	6 191	硬石膏	+34.7	
塔里木盆地	奥陶纪早期	Ma401	2042	硬石膏	+26.1	+26.1 (Cai et al., 2009)
		Sh-27	2 500	含石膏团块的碳酸盐岩	+27.9	
		Sh-12	2 500	含石膏的碳酸盐岩	+27.1	
鄂尔多斯盆地	奥陶纪中期	Sh-42	2 500	硬石膏	+28.0	+27.7 (姚涇利等, 2010)
		Sh-42	2 500	硬石膏	+27.8	
		Sh-42	2 500	含石膏的碳酸盐岩	+27.7	

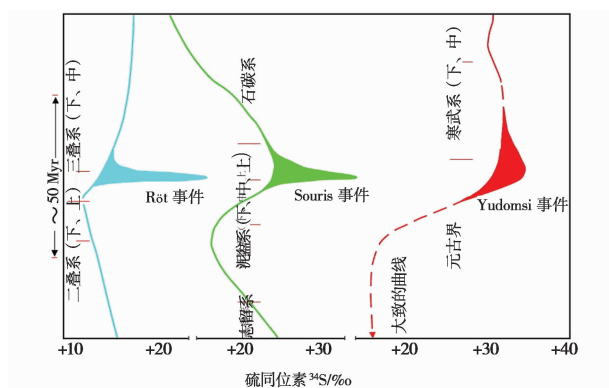


图 4 地质历史时期的三次硫酸盐硫同位素异常事件^[17]

Fig. 4 Three sulfur isotope abnormal events of sulphate in geological period

到最低,大致是 +10.5‰左右^[10](图 2);这些硫同位素数值的差异,可以帮助快速确定井下的蒸发岩所在的地层。

在塔里木盆地的寒武纪早期、中期的地层也保存了“Yudomski”事件的信息^[22];在许多非海相盆地,如柴达木盆地、濮阳凹陷等也出现了异常的硫同位素高值;但是这些异常的硫同位素高值是由于封闭的盐湖环境下,有限的硫酸盐供应下由于硫化物的沉淀造成盐湖中的硫酸盐的硫同位素数值升高,而这些非海相的硫酸盐岩的氧同位素目前还没有研究过^[28]。

由于石膏、硬石膏这些矿物是微溶于水的,因此在岩屑采集过程中被泥浆带上的石膏与硬石膏也可以保持一部分残渣,在双目镜下可以挑选出来;通过硫同位素测试建立蒸发岩盆地内部的硫同位素曲线。海相盆地的硫同位素则可以同国际上其他同时代的盆地相对比。

3 地质时期硫酸盐蒸发岩的氧同位素

国外学者曾经对前寒武纪到现代硫酸盐的 $\delta^{18}\text{O}$ 进行了分析,可以获得同时期海水中硫酸盐的 $\delta^{18}\text{O}$ 数据,并同时探讨了硫酸盐的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{34}\text{S}$ 之间的关系,但是数据十分有限。这些工作的基础,是探讨各个时代的海洋中硫酸盐的 ^{18}O 。海洋中的硫酸盐中的硫同位素随着地质时代有着明显的变化,而硫酸盐中的氧同位素也有相似的变化;

而国内类似的工作只是集中在 $\delta^{34}\text{S}$ 数据,而 $\delta^{18}\text{O}$ 数据十分稀少 $\delta^{[28]}$ 。现代海水中的硫酸盐的氧同位素数值在 +9.5 到 +10.1‰之间^[10]。海相硫酸盐中的氧同位素,与海水中的氧同位素有一个 +3.5‰的分馏;在考虑到固定的分馏范围基础上,海相硫酸盐岩也可以大致记录当时海水中硫酸根的氧同位素数据^[10]。

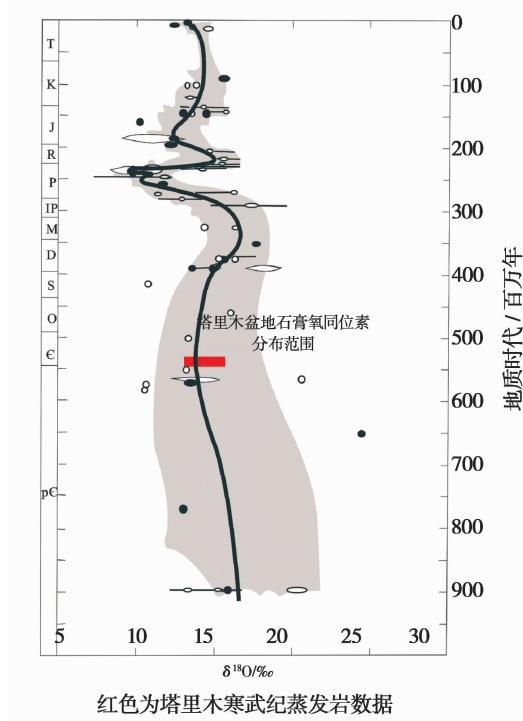


图 5 地质时期的硫酸盐氧同位素曲线^[21]

Fig. 5 oxygen isotope curves of Sulfate in geological period

Claypool 等^[10]曾经连续分析了 300 个蒸发岩样品的硫同位素,而这些样品中只有 60 个分析了氧同位素。63 个寒武纪的石膏样分析了硫同位素,但只有 6 个样品分析了 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素,数据分布从 +10.7 到 +15.7‰之间分布,平均值 = +13.89‰(图 5)。Peryt 等^[20]分析了西伯利亚寒武纪早期的 25 个石膏样品的硫同位素和氧同位素,其氧同位素的分布从 +11.9 to +17.8‰之间分布。孟凡巍等^[22]研究了 11 个塔里木盆地寒武纪早期—中期的石膏样品,其氧同位素从 +10.9 到 +15.7‰,平均值为 +13.4‰(图 5,表 1)。因此,塔里木寒武纪早期和中期的硫酸盐的氧同位素数据和国外同时代的数据基本吻合,也说明了海相硫酸盐岩也可以大致记录当时海水

中硫酸根的氧同位素组成。

4 结 论

塔里木盆地寒武纪早期—中期海相沉积成因的硬石膏硫同位素记录了新元古代晚期——寒武纪早期的“Yudomski”事件,与国外相同时期不同蒸发岩硫同位素的对比,表明了“Yudomski”事件的全球广泛的影响。而塔里木盆地奥陶纪早期海相成因的硬石膏硫同位素的数据显示急剧的下降,表明“Yudomski”事件结束在寒武纪晚期。塔里木盆地寒武纪早期—中期海相沉积成因的硬石膏氧同位素,与国外同时期蒸发岩中硬石膏氧同位素的范围相似,表明硬石膏氧同位素也具有化学地层的意义。

参考文献:

- [1] Awramik S M. The Precambrian-Cambrian boundary and geochemical perturbations[J]. *Nature*, 1986, 319: 696 – 696.
- [2] Brennan S T, Lowenstein T K, Horita J. Seawater chemistry and the advent of biocalcification [J]. *Geology*, 2004, 32: 473 – 476.
- [3] Morris C S. The fossil record and the early evolution of the Metazoa[J]. *Nature*, 1993, 361: 219 – 225.
- [4] Kovalevych V M, Marshall T, Peryt T M, *et al.* Chemical composition of seawater in Neoproterozoic: Results of fluid inclusion study of halite from Salt Range (Pakistan) and Amadeus Basin (Australia) [J]. *Precambrian Research*, 2006, 144: 39 – 51.
- [5] Wille M, Nagler T F, Lehmann B, *et al.* Hydrogen sulphide release to surface waters at the Precambrian/Cambrian boundary [J]. *Nature*, 2008, 453: 767 – 769.
- [6] Schiffbauer J D, Huntley J W, O'Neil G R, *et al.* The Latest Ediacaran Wormworld Fauna: Setting the Ecological Stage for the Cambrian Explosion[J]. *GSA Today*, 2016, 26: 4 – 11.
- [7] Thode H G, Monster J, Dunford H. Sulphur isotope geochemistry [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1961, 25: 159 – 174.
- [8] Raab M, Spiro B. Sulfur isotopic variations during seawater evaporation with fractional crystallization [J]. *Chemical Geology*, 1991, 86: 323 – 333.
- [9] Holser W T, Kaplan I R. Isotope geochemistry of sedimentary sulfates [J]. *Chemical Geology*, 1966, 1: 93 – 135.
- [10] Claypool G E, Holser W T, Kaplan I R, *et al.* The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation [J]. *Chemical geology*, 1980, 28: 199 – 260.
- [11] Meng F W, Zhang Y S, Galamay A R, *et al.* Ordovician seawater composition: evidence from fluid inclusions in halite [J]. *Geological Quarterly*, 2018, 62: 344 – 352.
- [12] Chaudhuri S, Clauer N. History of marine evaporites: constraints from radiogenic isotopes [J] // Chaudhuri, S., Clauer, N. *Isotopic Signature and Sedimentary Records*. 43; *Lecture Notes Earth Science*; 1992: 177 – 198.
- [13] 张智礼, 孟凡巍, 蔡习尧, 等. 新疆塔里木板块巴楚隆起区寒武系石盐氯同位素研究 [J]. *微体古生物学报*, 2013, 30: 239 – 243.
- [14] 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: 409 – 430.
- [15] Kaufman A J, Knoll A H. Neoproterozoic variations in C-isotopic composition of seawater: stratigraphic and biogeochemical implications [J]. *Precambrian Research*, 1995, 73: 27 – 49.
- [16] Longinelli A. Oxygen – 18 and sulphur – 34 in dissolved oceanic sulphate and phosphate [M] // Fritz P, Fontes J C, editors. *Handbook of environmental isotope geochemistry vol 3*. Amsterdam: Elsevier; 1989. 219 – 255.
- [17] Holser W T. Catastrophic chemical events in the history of the ocean [J]. *Nature*, 1977, 267: 403 – 408.
- [18] Holser W T. Gradual and abrupt shifts in ocean chemistry during Phanerozoic time [M] // Holland H D, Trendall A F, eds. *Patterns of change in Earth evolution*. Verlag, Berlin: Springer; 1984: 123 – 143.
- [19] Shields G A, Strauss H, Howe S S, *et al.* Sulphur isotope compositions of sedimentary phosphorites from the basal Cambrian of China: implications for Neoproterozoic-Cambrian biogeochemical cycling [J]. *Journal of the Geological Society*, 1999, 156: 943 – 956.
- [20] Peryt T M, Hałas S, Kovalevych V M, *et al.* The sulphur and oxygen isotopic composition of Lower Cambrian anhydrites in East Siberia [J]. *Geological Quarterly*, 2005, 49: 235 – 242.
- [21] Meng F W, Zhang Z L, Schiffbauer J D, *et al.* The Yudomski event and subsequent decline: new evidence from $\delta^{34}\text{S}$ data of lower and middle Cambrian evaporites in the Tarim Basin, western China [J]. *Carbonates and Evaporites*, 2019, 34: 1117 – 1129.
- [22] Meng F W, Zhang Z L, Yan X Q, *et al.* Stromatolites in Middle Ordovician carbonate-evaporite sequences and their carbon and sulfur isotopes stratigraphy, Ordos Basin, northwestern China [J]. *Carbonates and Evaporites*, 2019, 34: 11 – 20.
- [23] Cai C, Zhang C, Cai L, *et al.* Origins of Palaeozoic oils in the Tarim Basin: Evidence from sulfur isotopes and biomarkers [J]. *Chemical Geology*, 2009, 268: 197 – 210.
- [24] Fox J S, Videtich P E. Revised estimate of $\delta^{34}\text{S}$ for marine sulfates from the Upper Ordovician: data from the Williston Basin, North Dakota, USA [J]. *Applied geochemistry*, 1997, 12: 97 – 103.
- [25] Meng F W, Galamay A R, Ni P, *et al.* The major composition of a middle-late Eocene salt lake in the Yunying depression of

- Jiangnan Basin of Middle China based on analyses of fluid inclusions in halite[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 85:97 – 105.
- [26] Strauss H. The sulfur isotopic record of Precambrian sulfates: new data and a critical evaluation of the existing record[J]. *Precambrian research*, 1993, 63:225 – 246.
- [27] Houghton M L. Geochemistry of the Proterozoic hormuz evaporites, southern Iran; University of Oregon; 1980.
- [28] 李庆宽, 樊启顺, 山发寿, 等. 海陆相蒸发岩硫同位素值变化和地球化学应用[J]. *盐湖研究*, 2018, 26:73 – 80.

“Yudomski” Isotope Anomaly Event during Neoproterozoic-Cambrian: Its Origin and End

ZHANG Zhi-li¹, MENG Fan-wei², NI Pei³, LI Hui-li¹, ZHUO Qin-gong^{4,5}

- (1. *Petroleum Exploration and Development Research Institute, SINOPEC, Beijing, 100083, China;*
 2. *State Key Laboratory of Palaeobiology and Stratigraphy, Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, 210008, China;*
 3. *School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing, 201193, China;*
 4. *Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Beijing, 100083, China;*
 5. *CNPC Key Laboratory of Basin Structure and Hydrocarbon Accumulation, Beijing, 100083, China*)

Abstract: In late Neoproterozoic-early Cambrian time major changes in earth's climate and ocean chemistry occurred. Ocean chemistry compositionally shifted from aragonite to calcite in late Neoproterozoic-early Cambrian time interval and complex marine life was evolved during this time interval. Moreover, the rock records indicate sporadic fluctuations in the values of carbon and strontium isotopes in the same time interval and in Paleozoic, also. Similarly, analysis of sulfur isotope compositions of Neoproterozoic-Cambrian marine evaporates show anomalously high values of ^{34}S due to enrichment of brines in $\delta^{34}\text{S}$. Holser termed $\delta^{34}\text{S}$ excursion as Yudomski Event after Yudomski and Motskaya Suit from late Proterozoic marine gypsiferous rocks of Siberia. Such high values of $\delta^{34}\text{S}$ have been observed in marine evaporates of middle Cambrian in Tarim basin that indicate that Yudomski Event prolonged to middle Cambrian in China.

Key words: Neoproterozoic; Cambrian; Anhydrite; Sulfur isotope; Yudomski Event