

塔里木盆地蓬莱坝剖面寒武系第二统一第三统界线处碳同位素负异常及其地质意义

王小林¹⁾, 胡文瑄¹⁾, 李庆¹⁾, 朱井泉²⁾

1) 南京大学地球科学与工程学院, 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京, 210093;

2) 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京, 100029

内容提要: 塔里木盆地柯坪地区蓬莱坝剖面是研究寒武系地层的典型剖面, 而迄今未有第二统一第三统界线处碳同位素演化研究。本研究对该剖面第二统吾松格尔组—第三统沙依里克组过渡区碳酸盐岩进行系统取样, 分析了 18 件样品的碳、氧同位素组成。结果表明, $\delta^{13}\text{C}(\text{V-PDB})$ 和 $\delta^{18}\text{O}(\text{V-PDB})$ 值分别分布于 $-4.2\text{‰} \sim 0.8\text{‰}$ 之间和 $-7.4\text{‰} \sim -3.8\text{‰}$ 之间, 二者之间相关性不明显, 并且 $\delta^{13}\text{C}$ 值在第二统与第三统界线处呈现明显的负漂移, 可达 -4.2‰ 。因此, $\delta^{13}\text{C}$ 值负漂移未受成岩作用影响, 真实反映了原始海水碳同位素组成特征, 可与北美、西伯利亚、华南以及华北地区的 ROECE 地质事件对比, 具有全球意义。鉴于 ROECE (Redlichiiid—Olenellid Extinction Carbon isotope Excursion) 事件约发生在 509 Ma, 所以本研究为区域地层研究提供了一个较为可靠的绝对年龄数据, 弥补了传统年代学研究方面的不足。此外, 这是 ROECE 事件在塔里木盆地的首次报道, 对寒武系地层划分以及全球对比具有重要科学意义。

关键词: 寒武系第二统一第三统; 碳同位素; 负漂移; 蓬莱坝剖面; 柯坪地区; 塔里木盆地

海水 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化受控于 ^{12}C 和 ^{13}C 在水体、生物与沉积物中的分配, 而这一过程又与构造运动、海平面变化、气候变化等地质因素密切相关 (Magaritz, 1991; Montañez et al., 2000), 因此, 海水 $\delta^{13}\text{C}$ 值被广泛用来研究重大地质事件 (Zhu et al., 2004)。研究表明, 碳同位素在碳酸盐岩沉淀过程中没有显著分馏, 因此海相碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化可以较好地反映当时海水 $\delta^{13}\text{C}$ 值的波动 (Anderson and Arthur, 1983; Romanek et al., 1992)。Veizer 等的研究表明, 重要地质事件或者地层界线处常伴随着 $\delta^{13}\text{C}$ 值的正或负漂移 (Veizer et al., 1999)。据此, 众多地质学家根据海相碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值演化探讨全球地层对比与划分, 这是地球科学领域的重要研究课题。

寒武纪是生命演化的重要时期, 其间有多次生命辐射与灭绝事件。大量研究表明, $\delta^{13}\text{C}$ 值在寒武系地层划分与地质事件研究中具有重要意义 (王大锐等, 1994; 沈渭洲等, 1997; Jing et al., 2008; Brasier et al., 1994; Saltzman et al., 1998; Brasier and Sukhov, 1998; Montañez et al., 2000;

Saltzman et al., 2000; Saltzman et al., 2004; Zhu et al., 2004; Guo et al., 2005; Wotte et al., 2007; Buggisch et al., 2003; Guo et al., 2010)。Zhu 等总结了前人大量关于寒武纪碳同位素的研究成果, 识别出寒武纪主要的 10 次 $\delta^{13}\text{C}$ 漂移记录 (Zhu et al., 2006)。其中, 寒武系第二统和第三统界线处有一明显负漂移事件, 被命名为为 ROECE 事件 (Redlichiiid—Olenellid Extinction Carbon isotope Excursion), 这次 $\delta^{13}\text{C}$ 负漂移与两种三叶虫 (*Redlichiiid* 与 *Olenellid*) 的灭绝时间一致 (Zhu et al., 2006)。目前, 有关 ROECE 的报导主要集中在北美 (Laurentia) (Montañez et al., 2000), 西伯利亚 (Shabanov et al., 2008), 华北 (Zhu et al., 2004) 以及华南地区 (Yang et al., 2003; Zhu et al., 2004; Guo et al., 2010)。塔里木盆地寒武纪古生物地层与华南、华北地区均可对比 (周志毅, 2001; Peng, 2009), 因此理论而言, 在塔里木盆地也应有此次地质事件的碳同位素记录, 然而, 迄今未有相关报道。

塔里木盆地柯坪地区蓬莱坝剖面位于盆地西北

注: 本文为国家科技重大专项 (编号 2008ZX05005-002-007HZ) 的成果。

收稿日期: 2010-05-11; 改回日期: 2010-11-02; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 王小林, 男, 1982 生。南京大学地球科学与工程学院矿物学、岩石学、矿床学专业博士研究生。主要从事碳酸盐岩储层地质学研究。通讯地址: 210093, 江苏省南京市汉口路 22 号南京大学地球科学与工程学院; Email: xl.wang.geo@gmail.com。

缘,出露晚震旦统至寒武系较完整的海相地层,是研究塔里木盆地寒武系地层的典型剖面。目前该区碳同位素地层学的研究主要集中在前寒武—寒武系界线(王大锐等,1994)与寒武系—奥陶系界线处(Jing et al., 2008)。本文主要研究寒武系第二统一第三统界线处的碳同位素变化特征,并讨论其地质意义。

1 地质背景

塔里木盆地柯坪地区蓬莱坝剖面位于盆地西北部(图 1),按传统划分标准,该区寒武系地层从下往上可以划分为下寒武统(玉尔吐斯组、肖尔布拉克组和吾松格尔组)、中寒武统(沙依里克组和阿瓦塔格组)以及上寒武统丘里塔格下亚群(图 2)。除中寒武统阿瓦塔格组含蒸发岩外,寒武系地层基本由碳酸盐岩组成。

周志毅(2001)详细研究了这一地区的寒武系古生物地层,并与华南古生物地层进行对比。最近,国际地层委员会寒武系分会通过了全球寒武系四统十阶的划分方案(彭善池和 Babcock, 2005)。据此方案,Peng (2009)总结了我国华南地区寒武系古生物地层与年代地层 1978 年以来的研究,建立了华南地区新的寒武系年代地层框架(图 2)。根据上述古生物地层学研究,柯坪地区寒武系下统吾松格尔组与中统沙依里克组分别属于新划分方案中的第二统上部与第三统下部(图 2)。吾松格尔组岩性主要为白云岩,沙依里克组中一下部也主要由白云岩组成,顶部发育灰岩与含云灰岩。

2 样品与实验方法

分析样品采自蓬莱坝剖面寒武系吾松格尔组顶部与沙依里克组,在约 70 m 地层上连续取样 18 件,其中,地层界线处加密取样,而两侧取样间隔厚度稍大(表 1)。18 件样品中有 15 件是白云岩,2 件是含云灰岩,1 件是灰岩。1 号到 3 号样品来自寒武系第二统吾松格尔组,而其余 15 件样品皆来自第三统沙依里克组。在样品取样过程中,避开了受明显风化的岩石,以期其同位素组成能尽量反映原始沉积特征(谢小敏等,2009)。

碳、氧同位素测定在南京大学内生金属成矿机制研究国家重点实验室 MAT-252 质谱仪上完成。制样过程中,为尽量

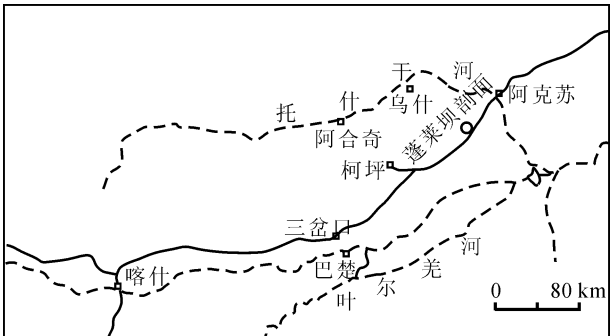


图 1 塔里木盆地柯坪地区蓬莱坝剖面地理位置
Fig. 1 Sketch map showing the location of the Kalpin area and the Penglaiba section in the Tarim Basin

避免杂质矿物的影响,采用牙钻钻取局部样品,牙钻钻头直径为 1 mm,将钻取的样品再研磨至小于 200 目,首先置温箱中烘干,然后在真空中与 100% 的正磷酸反应(McCrea, 1950),产生的 CO₂ 气体送入仪器分析,所得碳、氧同位素数值的千分差以 V-PDB 标准计算,分析 $\delta^{13}\text{C}$ (V-PDB)、 $\delta^{18}\text{O}$ (V-PDB)绝对误差小于 $\pm 0.10\%$ 。

3 结果

如表 1,18 件样品的 $\delta^{13}\text{C}$ (V-PDB)总体分布于

表 1 塔里木盆地柯坪地区蓬莱坝剖面寒武系吾松格尔组与沙依里克组碳酸盐岩碳氧同位素分析结果
Table 1 Carbon and oxygen isotope values of carbonates from Wusongger and Shayilik formations in Penglaiba section, Kalpin area, Tarim Basin

序号	样号	层位	厚度 (m)	岩性	$\delta^{13}\text{C}$ (‰, V-PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰, V-PDB)
1	P-59	吾松格尔组	0	白云岩	-0.5	-4.4
2	P-67-1	吾松格尔组	6	白云岩	-1.4	-4.7
3	P-60	吾松格尔组	12	白云岩	0.0	-4.2
4	P-61	沙依里克组	20	白云岩	-4.0	-4.1
5	P-69-1	沙依里克组	22	白云岩	-4.2	-4.3
6	P-63	沙依里克组	24	白云岩	-2.6	-4.4
7	P-64	沙依里克组	26	白云岩	-3.2	-6.0
8	P-73-1	沙依里克组	28	白云岩	-3.1	-4.3
9	P-73-2	沙依里克组	30	白云岩	-2.3	-5.3
10	P-65	沙依里克组	32	白云岩	-2.7	-4.1
11	P-67	沙依里克组	34	白云岩	-2.9	-5.1
12	P-68	沙依里克组	36	白云岩	-1.2	-6.3
13	P-70	沙依里克组	40	白云岩	0.6	-4.0
14	P-71	沙依里克组	44	白云岩	0.5	-3.8
15	P-72	沙依里克组	54	白云岩	0.8	-6.4
16	P-74	沙依里克组	66.8	灰岩	-0.7	-6.4
17	P-75	沙依里克组	68	含云灰岩	-0.8	-7.4
18	P-76	沙依里克组	70	含云灰岩	-0.5	-6.7

全球		华南		华南生物地层	柯坪地区	
统	阶	统	阶		生物带	地层
芙蓉统	第十阶	芙蓉统	牛车河阶	<i>Hysterolenus</i> (lower part)	<i>Teridontus nakamurai</i> <i>T.reclinatus</i> <i>T.eractus</i> <i>Saukiidee</i>	丘里塔格下亚群
				<i>Leiostegium constrictum</i> - <i>Shenjiawania brevis</i>		
				<i>Mictosaukia striata</i> - <i>Fatocephalus</i>		
				<i>Leiagnostus</i> cf. <i>bexelli</i> - <i>Archaeuloma taoyuanense</i>		
				<i>Lotagnostus americanus</i>		
	第九阶		桃源阶	<i>Probinacunaspis nasalis</i> - <i>Peichiashania hunanensis</i>		
				<i>Eolotagnostus decorus</i> - <i>Kaolishaniella</i>		
				<i>Rhaptagnostus ciliensis</i> - <i>Onchonotellus</i> cf. <i>kuruktagensis</i>		
				<i>Agnostotes orientalis</i>		
	排碧阶		排碧阶	<i>Tomagnostella orientalis</i> - <i>Corynexochus plumula</i>		
				<i>Agnostus inexpectans</i> - <i>Proceratopyge protracta</i>		
				<i>Glyptagnostus reticulatus</i>		
第三统	古丈阶	武陵统	古丈阶	<i>Glyptagnostus stolidotus</i>	未建带	阿瓦塔格组
				<i>Linguagnostus reconditus</i>		
				<i>Proagnostus bulbus</i>		
				<i>Lejopyge laevigata</i>		
	鼓山阶		王村阶	<i>Lejopyge armata</i>		
				<i>Goniagnostus nathorsti</i>		
				<i>Ptychagnostus punctuosus</i>		
				<i>Ptychagnostus atavus</i>		
第五阶	台江阶	<i>Ptychagnostus gibbus</i>	<i>Kunmingaspis-Chittidilla</i>	沙依里克组		
		<i>Peronopsis taijiangensis</i>				
		<i>Oryctocephalus indicus</i>				
第二统	第四阶	黔东统	都匀阶	<i>Ovatoryctocara granulata</i> - <i>Bathynotus holopygus</i>	<i>Paokannia</i>	吾松格组
				<i>Protoryctocephalus wuxunensis</i>		
				<i>Arthricocephalites taijiangensis</i>		
				<i>Arthricocephalus chauveaui</i>		
	第三阶		南皋阶	<i>Arthricocephalus jiangkouensis</i>	<i>Kepingaspis-Tianshanocephalus</i>	肖尔布拉克组
				<i>Szechuanolenus</i> - <i>Paokannia</i>	<i>Ushbaspis</i>	
				<i>Ushbaspis</i>		
				<i>Hupeidiscus</i> - <i>Sinodiscus</i>		
<i>Tsunyidiscus niutitangensis</i>						
纽芬兰统	第二阶	滇东统	梅树村阶	<i>Sinosachites flabelliformis</i> - <i>Tannuolina zhangwentangi</i>	未建带	玉尔吐斯组
				贫化石带		
				<i>Watsonella crosbyi</i>		
				<i>Paragloborilus subglobosus</i> - <i>Purella squamulosa</i>		
	幸运阶		晋宁阶	<i>Anabarites trisulcatus</i> - <i>Protohertzina anabarica</i>		
				无化石层		

图 2 塔里木盆地柯坪地区寒武系地层划分、古生物分带与华南的对比以及其在全球寒武系地层构
架中的位置[综合周志毅(2001)和 Peng(2009)修改]

Fig. 2 Stratigraphic division of Cambrian in Kalpin area and biostratigraphic correlation between Kalpin area and South
China [modified after Zhou (2001) and Peng (2009)]

-4.2‰~0.8‰之间,平均值为1.6‰;δ¹⁸O(V-PDB)分布在-7.4‰~-3.8‰之间,平均值为-5.1‰。其中,第二统3件样品δ¹³C值总体为低负值,介于0‰与-1.4‰之间,平均值为-0.6‰;δ¹⁸O值介于-4.2‰与-4.7‰之间,平均值为-4.4‰;第三统15件样品的δ¹³C值介于-4.2‰~0.8‰之间,平均值为-1.8‰;δ¹⁸O值在-7.4‰~-3.8‰之间,平均值为-5.2‰。

图 3 进一步展示了表 1 中的数据。在吾松格尔组与沙依里克组界线处,δ¹³C值存在一明显的负漂移,δ¹³C值从吾松格尔组顶部的0‰下降至吾松格尔组与沙依里克组界线处的-4.2‰。这说明,柯坪地区寒武系第二统与第三统界线处δ¹³C值的演化以存在一可达-4.2‰左右的负漂移为主要特征。相比

而言,δ¹⁸O值变化不甚明显,除沙依里克组顶部δ¹⁸O值相对较低外,寒武系第二统一第三统界线附近δ¹⁸O值基本大于-6.0‰。此外,如图3,δ¹⁸O值与埋藏深度之间无明显相关性。

4 讨论

4.1 样品成岩蚀变作用评估

在应用碳酸盐岩的碳氧同位素组成来研究原始沉积环境时,通常需要对样品受成岩蚀变作用的程度进行评估,因为成岩作用的影响会使得碳酸盐岩的δ¹³C值和δ¹⁸O值难以反映碳酸盐岩的原生沉积特征,而可能反映的是成岩作用特征(Wotte et al., 2007;谢小敏等,2009)。目前普遍认为,δ¹³C值在成岩过程中较为稳定,比如在大气淡水成岩环境中,碳

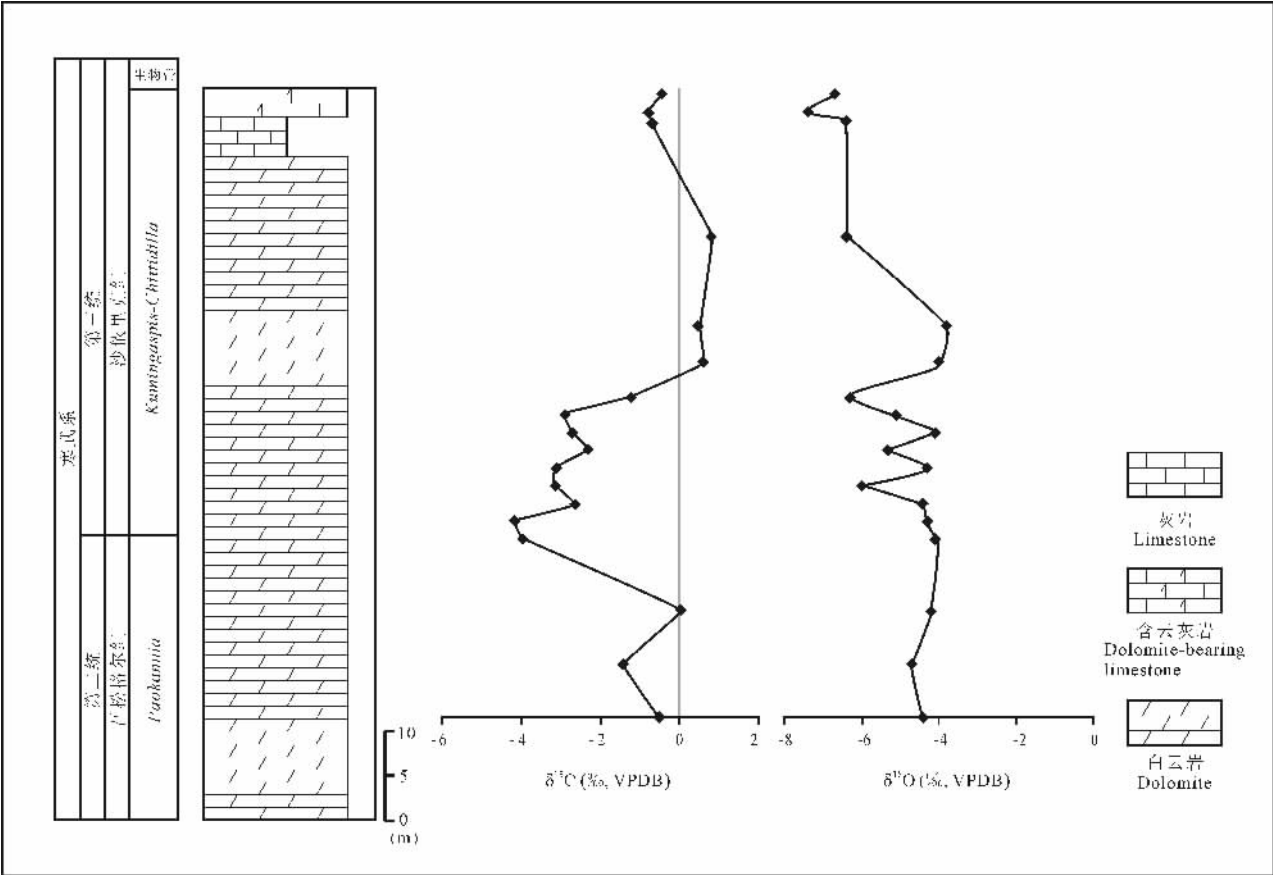


图 3 塔里木盆地柯坪地区蓬莱坝剖面寒武系吾松格尔组与沙依里克组界线处碳氧同位素剖面
Fig. 3 Carbon and oxygen isotope profile across transition of Wusongger and Shayilik
formations at the Penglaiba Section, Kalpin area, Tarim Basin

酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值的显著改变需要水岩比大于 1000 (Banner and Hanson, 1990; Gao and Land, 1991)。因此,交代成因白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要反映的是其前驱物灰岩而不是白云岩化流体的 $\delta^{13}\text{C}$ 特征 (Land, 1980)。但为了确保样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值反映的是原始海水的特征,在讨论碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值之前通常仍需要对其成岩蚀变作用进行评估。考虑到 $\delta^{18}\text{O}$ 值比 $\delta^{13}\text{C}$ 值更易受后生成岩蚀变作用影响,通常利用 $\delta^{18}\text{O}$ 值的大小以及其与 $\delta^{13}\text{C}$ 值的协变关系来反映成岩蚀变作用强弱 (Brasier et al., 1993; Glumac and Spivak-Birndorf, 2002; Zhu et al., 2004; Jing et al., 2008)。研究表明,当 $\delta^{18}\text{O}$ 值低于 -10‰ 时,其原始 $\delta^{18}\text{O}$ 特征已可能发生明显改变 (Kaufman and Knoll, 1995); 而 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 $-5\text{‰} \sim -10\text{‰}$ 之间的样品,其原始氧同位素组成可能发生改变,但碳同位素组成变化不大 (Derry et al., 1994)。

如表 1,图 3 所示,本次实验所测碳酸盐岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值均大于 -8‰ , 并且 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 值之间没有正向协变关系; 另外 $\delta^{18}\text{O}$ 值与埋藏深度之间相关性也不明显 (图 4), 这都表明样品受成岩蚀变作用的影响不大, 因此样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值有效记录了原始海水的信息 (Brasier et al., 1993; Glumac and Spivak-Birndorf, 2002; Zhu et al., 2004; Jing et al., 2008)。这为进行碳同位素的全球对比提供了良好

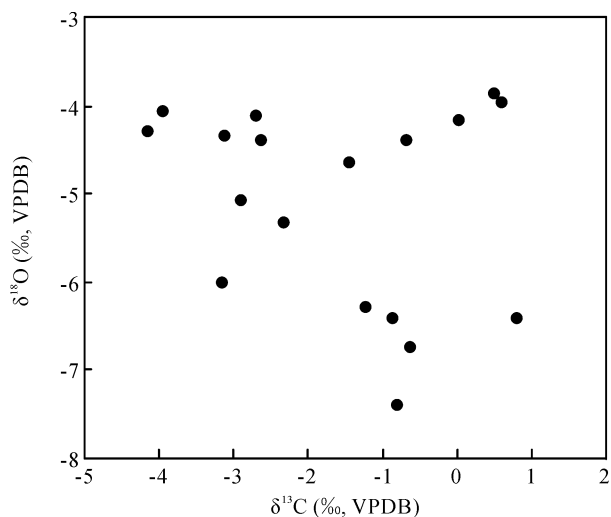


图 4 塔里木盆地柯坪地区蓬莱坝剖面寒武系吾松格尔组与沙依里克组界线处碳氧同位素投点图

Fig. 4 Carbon and Oxygen isotope crossplots of samples taken from the transition of Wusongger and Shayilik formations from the Penglaiba Section, Kalpin area, Tarim Basin

研究条件。

4.2 碳同位素全球对比

对于寒武系第二统一第三统界线处的这次碳同位素负漂移,国内外其它地区已有相关报道,表明可能为一全球事件。如 Montañez 等人在研究北美 (Laurentia) 地区寒武系第二统顶部至芙蓉统底部碳酸盐岩碳与锶同位素演化时发现,在寒武系第二统一第三统界线处有一明显 $\delta^{13}\text{C}$ 负漂移,可达 -4‰ (Montañez et al., 2000); Shabanov 等人在西伯利亚 Molodo 剖面也有类似的发现 (Shabanov et al., 2008)。在国内,华南 (Yang et al., 2003; Zhu et al., 2004; Guo et al., 2010) 与华北 (Zhu et al., 2004) 地区也均有相关报道 (图 5)。Zhu 等认为,该 $\delta^{13}\text{C}$ 负漂移事件与 Redlichii—Olenellid 三叶虫的灭绝时间一致,并将其命名为 ROECE (Redlichii—Olenellid Extinction Carbon isotope Excursion) 事件 (Zhu et al., 2006)。ROECE 事件可能与该时期显著的海平面上升事件相对应 (Montañez et al., 2000; Hough et al., 2006)。对于该次碳同位素负漂移的成因机理,最近,Guo 等根据在华南寒武系的研究实例,提出在低海平面时期,由于有机质以及含有机质碳酸盐岩的风化,导致海水中富集贫 ^{13}C 的溶解碳; 此后,随海平面上升,深层水体缺氧、富 ^{12}C 海水涌上,从而导致沉积的碳酸盐岩具有极低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值 (Guo et al., 2010)。

西伯利亚地台早寒武世地层出露完整,并且古生物地层学与年代学研究较为完善。Brasier 等人报道了西伯利亚地区 Atdabanian 阶中部至 Amgan 阶下部 $\delta^{13}\text{C}$ 值数据,并结合该时期生命演化讨论 $\delta^{13}\text{C}$ 值演化特征 (Brasier et al., 1994)。据其研究成果,Botomian 阶上部至 Toyonian 阶底部有一明显 $\delta^{13}\text{C}$ 负漂移,该负漂移与古杯类生物灭绝有关。此后,Botomian 阶 $\delta^{13}\text{C}$ 值较为稳定,并以低负值为主。而在 Toyonian—Amgan 界线处, $\delta^{13}\text{C}$ 值呈现弱的正漂移,可达 1‰ 左右。根据寒武纪新的年代地层划分标准, Botomian 阶与 Toyonian 阶底部应属于第二统,而 Toyonian 阶大部与 Amgan 阶应属于第三统。因此,Brasier 等人的研究表明西伯利亚地台并没有可靠的 ROECE 事件证据。而根据 Shabanov 等人的最新研究成果,西伯利亚 Molodo 剖面也有 ROECE 事件的记录 (Shabanov et al., 2008)。而西冈瓦纳地区 (西班牙 Cantabrian zone 与法国 Montagne Noire, Wotte et al., 2007) 和澳大利亚 (Lindsay et al., 2005) 却没有过硬的 ROECE 事件

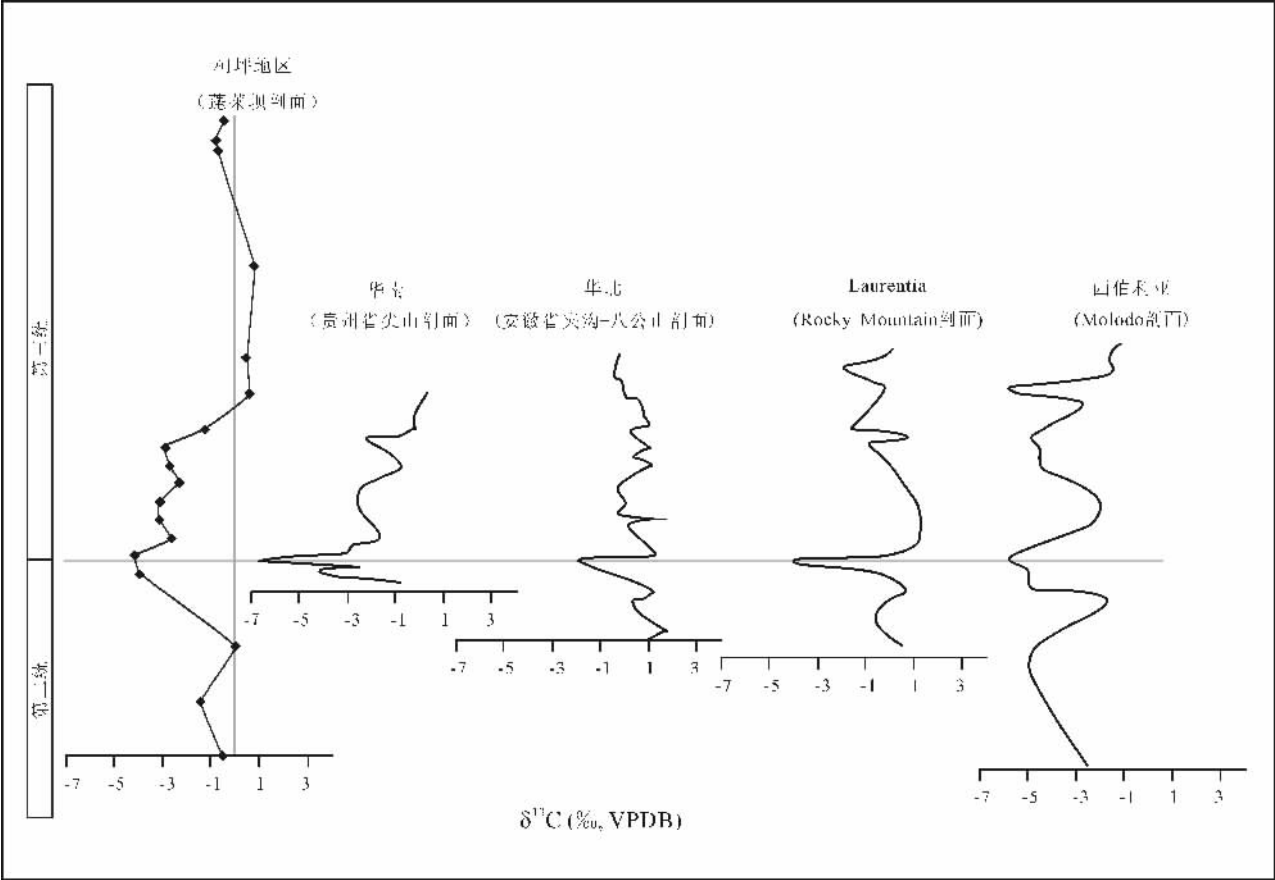


图 5 塔里木盆地柯坪地区寒武系第二统一第三统界线处碳同位素组成负异常与华南(Guo et al. , 2010)、华北(Zhu et al. , 2004)、Laurentia(Montañez et al. , 2000)以及西伯利亚(Shabanov et al. , 2008)的对比

Fig. 5 Comparative analysis of $\delta^{13}\text{C}$ signatures crossing the Cambrian Series 2—Series 3 transition in Kalpin area, South China, North China, Laurentia (North America) and Siberia; based on Guo et al. (2010), Zhu et al. (2004), Montañez et al. (2000) and Shabanov et al. (2008).

记录。上述地区缺失 ROECE 记录可能与早寒武末期海平面下降沉积物被剥蚀导致的地层缺失有关(Montañez et al. , 2000; Wotte et al. , 2007)。因此,上述地区寒武系第二统一第三统界线处相对较高的 $\delta^{13}\text{C}$ 值可能反映了 ROECE 事件后 $\delta^{13}\text{C}$ 值的上升(Wotte et al. , 2007)。

将这些地区碳酸盐岩样品碳同位素的演化曲线与本次工作的研究结果相互对比,结合已有的塔里木盆地古生物地层数据(周志毅, 2001; Peng, 2009),可见,柯坪地区寒武系吾松格尔组与沙依里克组界线处显著的 $\delta^{13}\text{C}$ 值负漂移现象可与全球 ROECE 事件对比(图 5)。

中国石油天然气集团公司对蓬莱坝剖面进行了详细的岩性分层,根据本研究碳同位素记录,寒武系第二统一第三统界线应位于第 69 层附近,该处地质年龄约为 509 Ma(Montañez et al. , 2000; Zhu et

al. , 2006)。鉴于塔里木盆地寒武系缺乏可用于年代学定年的相关材料,地层年龄数据报道较少,所以本次工作为该区域寒武系地层研究提供了较为可靠的参考信息。此外,塔里木盆地地表大多为沙漠所覆盖,利用钻井取芯研究古生物演化从而确定地层划分较为困难。因此,在系统研究盆地边缘出露寒武纪海相碳酸盐岩地层 $\delta^{13}\text{C}$ 值演化的基础上,结合区域岩性对比,利用碳同位素地层学方法来确定划分地层,这对于塔里木盆地寒武系地层研究以及油气勘探都将具有一定参考意义。

5 结论

塔里木盆地柯坪地区蓬莱坝剖面寒武系第二统(吾松格尔组)与第三统(沙依里克组)界线处有一明显碳同位素负异常,可达 -4.2‰ 。在确认该次 $\delta^{13}\text{C}$ 值负漂未受成岩作用影响,真实反映了地层原始沉

积特征的基础上,发现其可与北美、西伯利亚、华南以及华北地区寒武系第二统一第三统界线处的 ROECE 事件对比,具有全球对比意义。ROECE 事件约发生在 509 Ma,因此本研究为塔里木盆地柯坪地区寒武系地层提供了一个较为可靠的绝对年龄数据。这是 ROECE 事件在塔里木盆地的首次报道,对寒武系地层划分以及全球对比具有重要潜在意义。

致谢:中国科学院南京古生物地质研究所彭善池研究员为研究区寒武系地层划分与对比提出了有益建议;初稿蒙南京大学地球科学与工程学院曹剑博士认真阅读,并提出宝贵意见;野外工作得到中石化西北油田分公司钱一雄高工,陈跃工程师的帮助;中国地质科学院地质研究所章雨旭研究员与匿名审稿人提出了建设性意见。一并诚致谢忱!

参 考 文 献 / References

- 彭善池, Babcock L E. 2005. 全球寒武系年代地层再划分的建议. 地质学杂志, 29(1): 92~93, 96.
- 沈渭洲, 方一亭, 倪琦生, 刘燕, 林雨萍. 1997. 中国东部寒武系与奥陶系界线地层的碳氧同位素研究. 沉积学报, 15(4): 38~42.
- 王大锐, 白玉雷, 贾承造. 1994. 新疆柯坪地区前寒武—寒武系界线处碳同位素组成异常及意义. 科学通报, 39(11): 1008~1010.
- 谢小敏, 胡文瑄, 王小林, 钱一雄, 张军涛, 曹剑, 李庆. 2009. 新疆柯坪地区寒武纪—奥陶纪碳酸盐岩沉积旋回的碳氧同位素记录. 地球化学, 38(1): 75~78.
- 周志毅. 2001. 塔里木盆地各纪地层. 北京: 科学出版社.
- Anderson T F, Arthur M A. 1983. Stable isotopes of oxygen and carbon and their applications to sedimentological and paleoenvironmental problems. In: Arthur M A, Anderson T F, Kaplan I R, Veizer J, Land L S. eds. Stable Isotopes in Sedimentary Geology. Soc. Econ. Paleontol. Miner. Short Course, 10: 1~151.
- Banner J L, Hanson G N. 1990. Calculation of simultaneous isotopic and trace-element variations during water—rock interaction with applications to carbonate diagenesis. 54: 3123~3137.
- Brasier M D, Sukhov S S. 1998. The falling amplitude of carbon isotopic oscillations through the Lower to Middle Cambrian: northern Siberia data. Canadian Journal of Earth Sciences, 35: 353~373.
- Brasier M D, Corfield R M, Derry L A, Rozanov A Y, Zhuravlev A Y. 1994. Multiple $\delta^{13}\text{C}$ excursions spanning the Cambrian explosion to the Botomian crisis in Siberia. Geology, 22: 455~458.
- Brasier M D. 1993. Towards a carbon isotope stratigraphy of the Cambrian system: potential of the Great Basin succession. Geological Society, London Special publication, 70: 341~350.
- Buggisch W, Keller M, Lehnert O. 2003. Carbon isotope record of Late Cambrian to Early Ordovician carbonates of the Argentine Precordillera. Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 195: 357~373.
- Derry L A, Brasier M D, Corfield R M, Rozanov A Y, Zhuravlev A Y. 1994. Sr and C isotopes in Lower Cambrian carbonates from the Siberian craton: A paleoenvironmental record during the Cambrian explosion. Earth and Planetary Science Letters, 128: 671~681.
- Gao G, Land L S. 1991. Geochemistry of Cambro Ordovician Arbuckle limestone, Oklahoma: implication for diagenetic $\delta^{18}\text{O}$ alteration and $\delta^{13}\text{C}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ variations. Geochim. Cosmochim. Acta, 55: 2911~2920.
- Glumac B, Spivak-Birndorf M L. 2002. Stable isotopes of carbon as an invaluable stratigraphic tool: An example from the Cambrian of the northern Appalachians, USA. Geology, 30: 563~566.
- Guo Q, Strauss H, Liu C, Zhao Y, Pi D, Fu P, Zhu L, Yuan J. 2005. Carbon and oxygen isotopic composition of Lower to Middle Cambrian sediments at Taijiang, Guizhou Province, China. Geological Magazine, 142: 723~733.
- Guo Q, Strauss H, Liu C, Zhao Y, Yang X, Peng J, Yang H. 2010. A negative carbon isotope excursion defines the boundary from Cambrian Series 2 to Cambrian Series 3 on Yangtze Platform, South China. Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 285(3~4): 143~151.
- Hough M L, Shields G A, Evins L Z, Strauss H, Henderson R A, Mackenzie S. 2006. A major sulphur isotope event at 510 Ma: a possible anoxia—extinction—volcanism connection during the Early Middle Cambrian transition? Terra Nova, 18: 257~263.
- Jing X, Deng S, Zhao Z, Lu Y, Zhang S. 2008. Carbon isotope composition and correlation across the Cambrian—Ordovician boundary in Kalpin Region of the Tarim Basin, China. Science in China (Series D), 51(9): 1317~1329.
- Kaufman A J, Knoll A H. 1995. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: stratigraphic and biogeochemical implications. Precambrian Research, 73: 27~49.
- Land L S. 1980. The isotopic and trace element geochemistry of dolomite: The state of the art. In: Zenger D H. et al. eds. Concepts and Models of Dolomitization. SEPM Special Publication, 28: 87~110.
- Lindsay J F, Kruse P D, Green O R, Hawkins E, Brasier M D, Cartledge J, Corfield R M. 2005. The Neoproterozoic Cambrian record in Australia: a stable isotope study. Precambrian Research, 143: 113~133.
- Magaritz M, Kirschvink J L, Latham A J, Zhuravlev A Y, Rozanov A Y. 1991. Precambrian/Cambrian boundary problem: Carbon isotope correlations for Vendian and Tommotian time between Siberia and Morocco. Geology, 19: 847~850.
- McCrea J M. 1950. On the isotope chemistry of carbonates and a palotemperature scale. Journal of Chemical Physics, 18: 849~857.
- Montañez I P, Osleger D A, Banner J L, Mack L E, Masgrove M L. 2000. Evolution of the Sr and C isotope composition of Cambrian oceans. GSA Today, 10: 1~7.
- Peng S C. 2009. The newly-developed Cambrian biostratigraphic succession and chronostratigraphic scheme for South China. Chinese Sci. Bull., 54: 4161~4170.
- Romanek C S, Grossman E L, Morse J W. 1992. Carbon isotopic fractionation in synthetic aragonite and calcite: effects of temperature and precipitation rate. Geochimica et Cosmochimica Acta, 56: 419~430.

- Saltzman M R, Ripperdan R L, Brasier M D, Lohmann K C, Robison R C, Chang W T, Peng S, Ergaliev E K, Runnegar B R. 2000. A global carbon isotope excursion (SPICE) during the Late Cambrian; relation to trilobite extinction, organic-matter burial, and sea level. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 160: 211~223.
- Saltzman M R, Runkel A C, Cowan C A, Runnegar B, Stewart M C, Palmer A R. 2004. The upper Cambrian SPICE ($\delta^{13}\text{C}$) event and the Sauk II - Sauk III regression: new evidence from Laurentian basins in Utah, Iowa and Newfoundland. *Journal of Sedimentary Research*, 74: 366~377.
- Saltzman M R, Runnegar B, Lohmann K C. 1998. Carbon isotope stratigraphy of Upper Cambrian (Steptoean Stage) sequences of the eastern Great Basin: record of a global oceanographic event. *Geological Society of America Bulletin*, 110: 285~297.
- Shabanov Yu Ya, Korovnikov I V, Pereladov V S, Pak K L, Feflov A F. 2008. The section of the Kuonamka Formation of the Molodo River—a candidate for a global stratigraphy of the lower boundary of the Middle Cambrian (East Siberian Platform). *Cambrian sections of the Siberian Platform—stratotype candidates for an international stratigraphic scaling (Stratigraphy and Palaeontology)*. Material of the 13th International Field Conference of the Cambrian Subdivision Working Group. Yakutia, 60~70.
- Veizer J, Ala D, Azmy K, Bruckschen P, Buhl D, Bruhn F, Carden G A F, Diener A, Ebner S, Godderis Y, Jasper T, Korte C, Pawellek F, Podlaha O G, Strauss H. 1999. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater. *Chemical Geology*, 161: 59~88.
- Wotte T, álvaro J J, Shields G A, Brown B, Brasier MD, and Veizer J. 2007. C-, O- and Sr-isotope stratigraphy across the Lower - Middle Cambrian transition of the Cantabrian Zone (Spain) and the Montagne Noire (France), West Gondwana. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 256: 47~70.
- Yang R, Zhu L, Wang S. 2003. Negative carbon isotopic excursion on the Lower/Middle Cambrian boundary of Kaili Formation, Taijiang County, Guizhou Province, China: Implications for mass extinction and stratigraphic division and correlation. *Science in China (Series D)*, 46(9): 872~881.
- Zhu M, Babcock L E, Peng S. 2006. Advances in Cambrian Stratigraphy and paleontology: integrating correlation techniques, palaeobiology, taphonomy and paleoenvironmental reconstruction. *Palaeoworld*, 15: 217~222.
- Zhu M, Zhang J, Li G, Yang A. 2004. Evolution of C isotopes in the Cambrian of China: implications for Cambrian subdivision and trilobite mass extinctions. *Geobios*, 37:287~301.

Negative Carbon Isotope Excursion on the Cambrian Series 2—Series 3 Boundary for Penglaiba Section in Tarim Basin and Its Significances

WANG Xiaolin¹⁾, HU Wenxuan¹⁾, LI Qing¹⁾, ZHU Jingquan²⁾

1) *School of Earth Sciences and Engineering, State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Nanjing University, Nanjing, 210093;*

2) *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029*

Abstract: Penglaiba section of the Kalpin area, Tarim Basin, serves as a typical section for Cambrian research, whereas no detailed carbon isotopic research on the Cambrian Series 2—Series 3 boundary has been documented up to date. Carbon isotope analyses were carried out on the carbonate rocks of Cambrian Series 2 (Wusongger Formation)—Series 3 (Shayilik Formation) transition in the Penglaiba section. The $\delta^{13}\text{C}$ values (V-PDB) vary between -4.2‰ and 0.8‰ , while the $\delta^{18}\text{O}$ values (V-PDB) vary between -7.4‰ and -3.8‰ . Moreover, there is no obvious correlation between the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values, indicating the $\delta^{13}\text{C}$ values recorded a memory of ancient seawater chemistry. A large negative $\delta^{13}\text{C}$ excursion up to -4.2‰ at the boundary between the Wusongger and Shayilik formations characterize the Cambrian Series 2—Series 3 boundary. This negative $\delta^{13}\text{C}$ excursion could be correlated with the ROECE events reported for Laurentia, Siberia, North China and South China. As ROECE happened at approximately 509 Ma, our report offers a reliable age for the Cambrian strata in the Tarim Basin. This work is also the first report of ROECE excursion in the Tarim Basin, and highlights the great potential of $\delta^{13}\text{C}$ variation in Cambrian subdivision and global correlation.

Key words: Cambrian Series 2—Series 3; carbon isotope; negative excursion; Penglaiba section; Kalpin area, Tarim Basin