

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

塔里木盆地中、上奥陶统烃源岩的 碳同位素宏观证据

王大锐

中国石油天然气集团公司油气地球化学重点实验室,北京,100083

内容提要 经过十余年的勘探,已在塔里木盆地探明13个大、中型油气田和33个工业性含油构造,但关于塔里木盆地的古生界主力烃源岩一直有争议。本文根据两条有代表性的地表剖面和两条钻井剖面的海相碳酸盐岩碳、氧稳定同位素分析与研究,发现了中、上奥陶统碳同位素组成的大幅度正向波动,认为这是当时全球范围大陆冰川作用的结果,这一时期有利于沉积有机质的保存。结合有机质丰度、成熟度指标(R_o)以及沉积相等地质因素综合分析,提出了塔里木盆地中、上奥陶统烃源岩的碳同位素宏观证据。同时,论述了中、上奥陶统海相碳酸盐岩作为我国下扬子地区及华北地台西缘海相下古生界寻找有效烃源岩重点层系的可能性与前提条件。

关键词 碳同位素 下古生界 烃源岩 塔里木

塔里木盆地是一个由古生代海相克拉通与南、北几个中、新生代前陆盆地叠加、复合型的大型盆地(胡冰,1965;王毅等,1994;于炳松,1996;张光亚等,1998;陈楚铭等,1999;王毅等,1999;梁狄刚,1999;刘银河等,1999)。研究证明,塔里木盆地是一个多油气源盆地,下古生界是一套低有机质丰度、高成熟度的海相地层,并经历了漫长的地质演化过程,使得烃源岩分布与判别更为复杂(梁狄刚,1999)。在“八·五”期间,明确了台盆区的主力烃源岩层为寒武系—奥陶系(贾承造,1997;黄第藩等,1999)。但是轮南区的寒武纪—奥陶纪地层厚达1800 m以上,内部沉积相变化很大,生烃能力变化也很大,加上烃源岩古老,又经历了多阶段的生油作用。因此,仅从地质条件来认定寒武系—奥陶系海相碳酸盐岩是轮南地区的主力烃源岩显然过于笼统(梁狄刚,1999)。

目前,塔里木盆地巨厚的寒武系与奥陶系可以识别出两套工业性烃源岩,即下、中寒武统的硅质泥岩、泥灰岩、泥质白云岩和磷灰岩与中、上奥陶统的泥质灰岩、泥灰岩、灰质泥岩和泥页岩。然而,在盆地中部,有机碳含量大于0.5%的碳酸盐岩厚度只有38 m,且 R_o 已达1.64%~2.45%,为高一过成熟生气岩;西部为170~200 m厚的蒸发泻湖相;东部为153~336 m厚的次补偿深水盆地相;只有东北缘库鲁克塔格与西缘柯坪地表露头处的有机碳含量较高(0.5%~5.52%,最高可达14%)。而在满加尔凹陷南、西、北侧向台地相过渡的台缘斜坡上的一套富含有机质的泥质碳酸盐岩以及在盆地西缘柯坪地表出露的半闭塞海湾相泥质岩,其有机碳含量可高达0.5%~5.54%和0.5%~2.78%,厚度分别可达300 m与100 m,而且 R_o 值为0.8%~1.3%,属中等成熟度(梁狄刚,1999)。

而且,使用与特殊生源有关的生物标志物进行油—岩对比,发现目前塔里木盆地保存的海相工业油藏大多来源于中、上奥陶统的中等成熟度烃源岩,而与高一过成熟的下、中寒武统烃

源岩无可比性(梁狄刚,1999;贾承造,1997)。

因此,对于塔里木盆地地下古生界的主力烃源岩值得进一步分析、确认。

1 中、上奥陶统烃源岩的碳同位素证据

1.1 样品与分析方法

选用生物地层界线明确的地表剖面以保证地质时代的确定,然后选用无化石或少化石的钻井剖面,进行稳定同位素地球化学分析。地表露头选用塔里木盆地西北缘的柯坪剖面和东北部的库鲁克塔格剖面。这两个地区,尤其是柯坪剖面,下古生界出露良好、层序齐全,地层界线清楚,古生物研究程度也较高,是塔里木盆地进行下古生界稳定同位素地球化学研究的优选剖面。钻井剖面主要选自英买力地区和塔中地区。这些地区所钻遇的下古生界均为海相碳酸盐岩,含有少量牙形石化石,可为地层时代的确定提供线索(图1)。所选样品均为未风化或极少风化的海相碳酸盐岩,采样间距为3~5 m,在生物地层界线附近加密至0.5~1 m。

分析采用 McCrea(1950)正磷酸法,在25℃真空条件下反应24 h,纯化并收集生成的CO₂气体,送 Finnigan-MAT 252 气体质谱仪检测其碳、氧同位素组成,仪器分析误差 $\delta^{13}\text{C}$ 值: $\pm 0.1\%$; $\delta^{18}\text{O}$ 值: $\pm 0.2\%$ 。所用标样为 GBW04405。共获得 585 组碳、氧同位素组成数据,与地层柱状图和钻井深度结合编绘成图 2、3、4。

1.2 中、上奥陶统碳酸盐岩碳同位素组成正向波动

(1)塔里木盆地 在浅水台地相的柯坪剖面,萨尔干组上部泥灰岩相当于中奥陶世的 Caradocian 期,即大致为我国华南的庙坡阶(安太彦,1987)。在英买力地区和塔中地区钻井剖面上,以牙形石 *Phragmodus undatus* 的出现和 *Llanvirnian* 的绝灭为下/中奥陶统的界线。中、上奥陶统多为灰色块状灰岩(周志毅等,1990)。在深水相沉积的库鲁克塔格剖面上,中奥陶统塞力克达组(O_{2s})及中、上奥陶统乌里格孜塔格组(O_{2-3w})为灰—深灰色块状—薄层生屑灰岩、砂屑灰岩、泥晶灰岩。

在这些地表露头与钻井剖面上,碳、氧同位素组成地层曲线在进入中、上奥陶统后都发生了明显的正向偏移(图 2、3、4),在柯坪剖面, $\delta^{13}\text{C}$ 值从下奥陶统的 -2% ~ 0% 增大至中、上奥陶统的 $+0.5\%$ ~ $+3\%$,增幅可达 $+4\%$ (PDB), $\delta^{18}\text{O}$ 值从 -9% 增大至 -5.5% ,增幅可达 4% ~ 3.5% ;在库鲁克塔格地区剖面上, $\delta^{13}\text{C}$ 值从下奥陶统至中、上奥陶统的增幅可达 2% , $\delta^{18}\text{O}$ 值增幅也达 2% 。

(2)我国华南地区 我国华南地区中、下扬子区下古生界海相碳酸盐岩广泛发育,各种沉积相均有展布,是开展相关研究的理想地区。在华南的苏南、苏北等区,海相下奥陶统的碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 -3.4% ~ -0.17% 和 -9.8% ~ -8.6% (PDB);至上奥陶统 $\delta^{13}\text{C}$ 值增大为 1.8% ~ 2.2% , $\delta^{18}\text{O}$ 值增大为 -3.2% ~ -2.5% (PDB)(王英华,1991),两值都



图1 塔里木盆地工作区与采样点示意
Fig. 1 Sketch of the research area and sampling locations in the Tarim basin
○—野外露头剖面;●—钻井剖面
○—Outcrop section;●—underground section

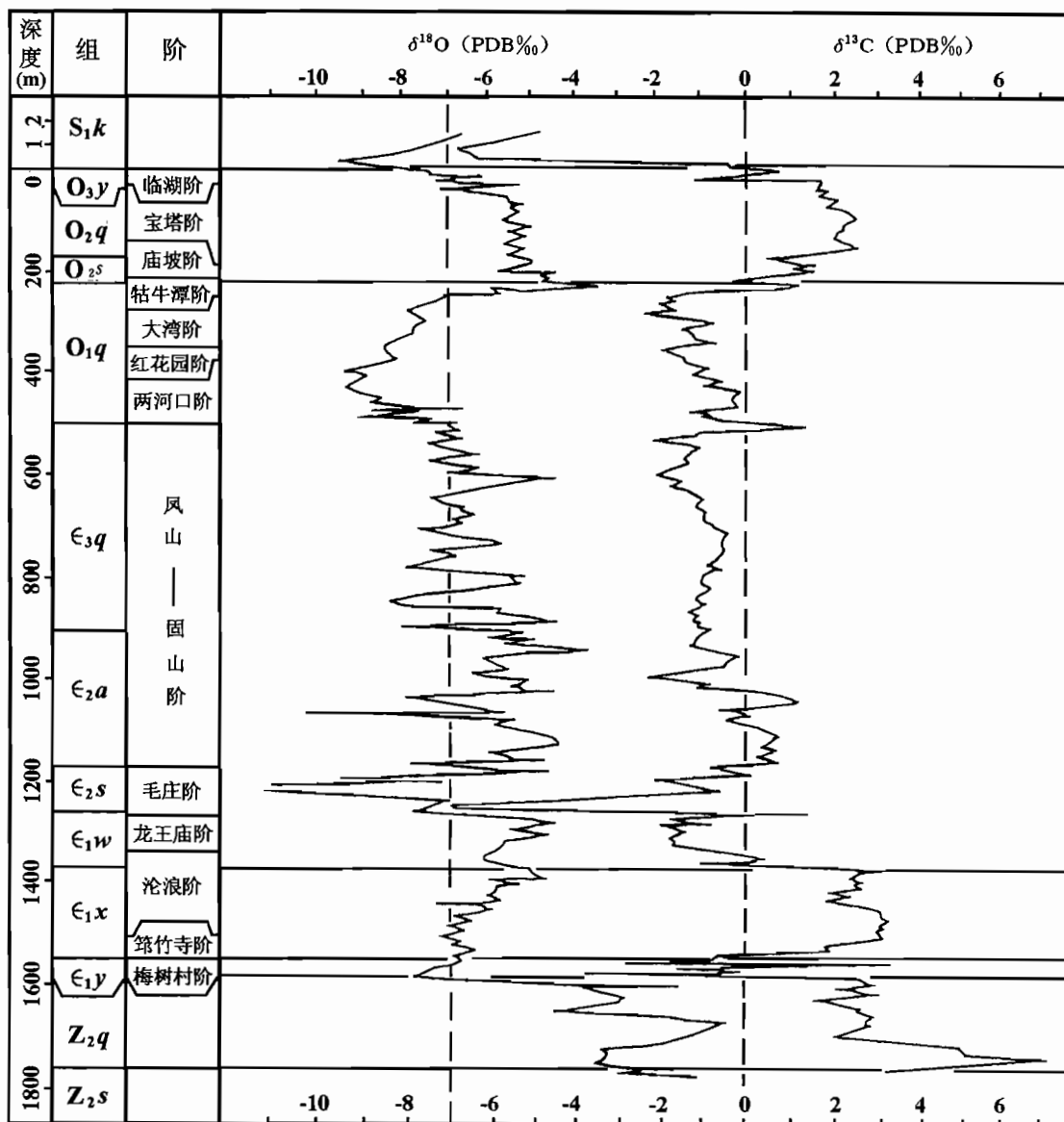


图2 塔里木盆地下古生界柯坪地表剖面海相碳酸盐岩 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线

Fig. 2 Stable isotopic composition of Lower Paleozoic marine carbonates in the Kalpin outcrop section, Tarim basin

发生了明显的正向偏移。

(3) 世界其他地区 根据对保存完好的奥陶纪 323 个腕足动物壳的同位素分析, 奥陶纪古海洋的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 $\delta^{13}\text{C}$ 值随着时代的延伸都呈增大的趋势。尤其是 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 从早奥陶世的 -2.5% 增至奥陶纪/志留纪地层界线处的 $+7\%$ (Qing et al., 1994)。这种增大从兰代洛世晚期开始明显, 至阿什及尔世 (Ashigillian) 达到最大值。

在北美与南美大陆, 从下奥陶统的特里马道克阶 (Tremadocian) 至上奥陶统阿什及尔阶, 海相腕足动物壳内的 $\delta^{13}\text{C}$ 值发生了约 4% 的正向偏移, 而这种偏移是从中奥陶统的兰维恩阶

(Llanvirnian)开始的(Wadleigh et al., 1992)。在瑞士中部及波罗的海沿岸国家、南美的阿根廷,海相碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值地层曲线从卡拉多克阶(Caradocian)顶部开始正向偏移,至阿什及尔阶上部达到最大值(Brechley et al., 1994; Marshall, 1997)。

与此相似,在北美与南美大陆区以及我国华南地区从中、上奥陶统开始,沉积有机质(干酪根及可溶有机质的族组成)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值亦有逐渐增大的趋势,至阿什及尔阶上部,达到最大值,增幅可达5‰(Marshall, 1997; Wang et al., 1997)。

可以看出,在中一晚奥陶世,尤其是晚奥陶世,在全球相当大的范围内,海洋中碳酸盐岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 $\delta^{13}\text{C}$ 值发生了明显的正向波动。

2 石油地质学意义

奥陶纪晚期发生的大陆冰川是全球最大规模的冰川事件之一,这已为地层学记录所证明(Berry et al., 1973; Chen, 1984; Hayes et al., 1989)。从石油地质学角度出发,这种大陆冰川活动也具有重大而深远的意义。

从碳酸盐岩与有机质的产率及埋藏关系可以看出(Hayes et al., 1989),有机界与无机界的碳同位素组成之间存在着密切的关系。

有机界与无机界的这种碳同位素组成的正向偏移是与中一晚奥陶世全球性海平面下降相伴的(Marshall, 1997)。这反映着当时古海洋中碳循环的重大改变,尤其是海洋表层碳库的变化。在晚奥陶世的大陆冰川发生时,气温骤变,使得中奥陶世大量繁盛的生物大批死亡,其体内富含的 ^{12}C 随即被埋入沉积物中,由于水温低、氧化缓慢,有利于沉积有机质在水底的保存、积累,这种碳同位素的分馏效应势必会造成海洋中的 ^{13}C 相对富集,即碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值增大。这种影响随后也会波及到生物圈,使得沉积有机质的碳同位素组成增重。这种富含有机质的岩系极有可能成为具有工业价值的烃源

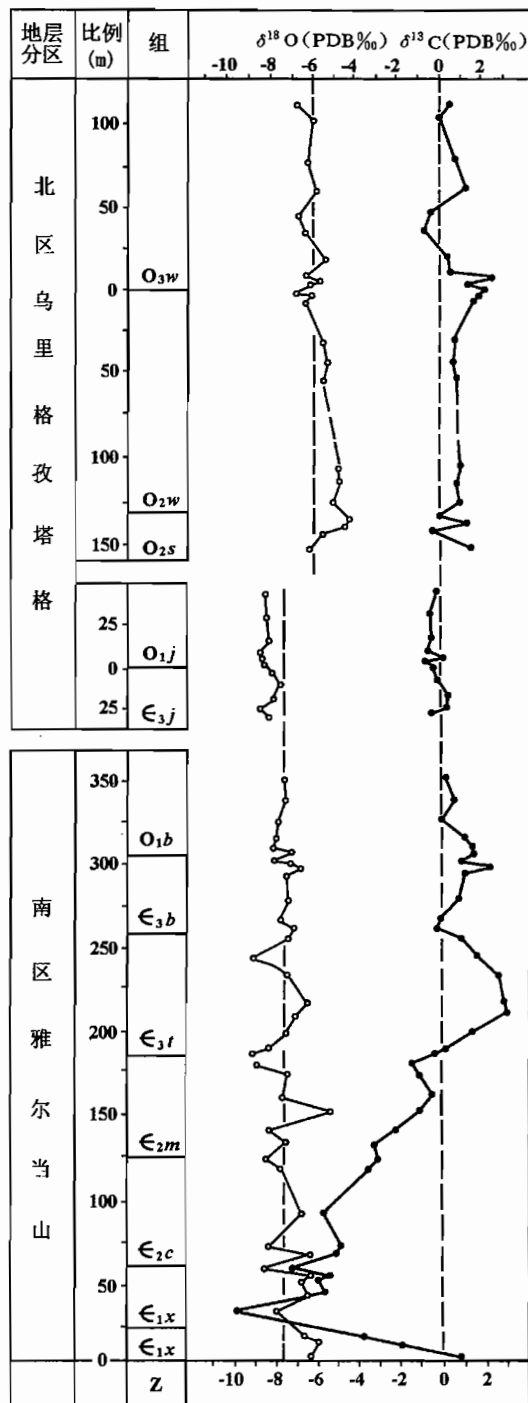


图 3 塔里木盆地地下古生界库鲁克塔格地表剖面海相碳酸盐岩 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线
Fig. 3 Stable isotopic composition of Lower Paleozoic marine carbonates in the Kuruktag outcrop section, Tarim basin

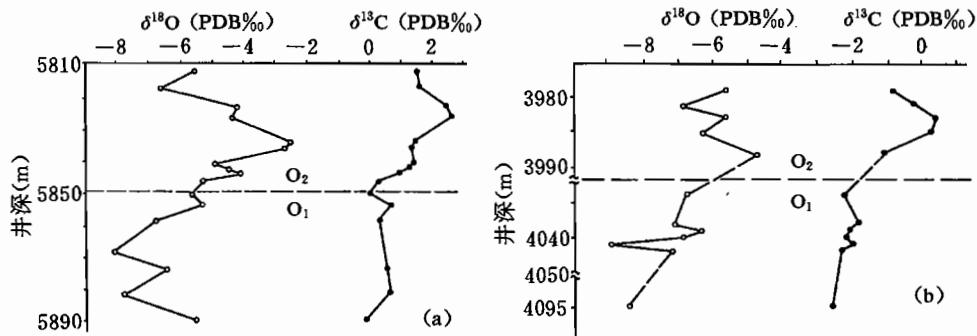


图4 塔里木盆地钻井剖面下古生界海相碳酸盐岩 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线示意

Fig. 4 Stable isotopic composition of Lower Paleozoic marine carbonates in the underground sections

(a) 塔中401井; (b) 英买201井

(a) Well Tazhong 401; (b) well Yingmai 201

岩。所以,中—晚奥陶世(尤其是晚奥陶世)应为地史中重要的成烃时期。

结合塔里木盆地多年的勘探实践以及其他项目的有机地球化学分析结果,从碳同位素组成与全球碳循环的关系来看,中、上奥陶统应为塔里木盆地下古生界重要的烃源岩系。

在塔里木盆地的柯坪地区,发育有厚达161 m的中、上奥陶统烃源岩,为陆棚—盆地相灰岩、灰黑色泥页岩、钙质泥岩及泥晶灰岩;库鲁克塔格地区的中、上奥陶统烃源岩厚度为334 m;区内以满加尔斜坡—盆地相的烃源岩最为发育,厚达700 m;即使在中央隆起区的巴楚、卡塔克、古城墟隆起上,中、上奥陶统烃源岩也分别厚达100 m、150 m和100~400 m;这套烃源岩在西南凹陷与东南盆缘也均有发育(梁狄刚,1999;贾承造,1997)。在成熟度、盖层、构造等条件有保障的前提下,可以成为主力烃源岩系。

我国近年来的勘探实践表明,如果塔里木盆地没有中、上奥陶统这套中等成熟的(R_o 为0.9%~1.3%)烃源岩,而只有高一过成熟的烃源岩,其结果将同四川盆地、鄂尔多斯盆地一样,只有工业性气藏,没有油藏。

在我国下古生界海相碳酸盐岩广泛发育的华南地区,中—晚奥陶世也发生了较大范围的海退(汤祖伟,1996;陈能贵等,1999)。在江南隆起边缘的凯里及中、下扬子区保存有 R_o 为0.6%~1.3%的成熟的中、上奥陶统(陈能贵等,1999)。在杭州湾区,中、上奥陶统的有机碳及沥青“A”含量远远高于早奥陶纪地层中的含量(葛芃芃,1996)。

在陕西省宝鸡—洛南断裂以北地区,及华北地台西缘地区,发育有以斜坡—盆地相碎屑岩、泥质灰岩为主,夹少量火山碎屑岩,厚度最大可达3000 m(杨应章,1997),尤其是晚奥陶纪地层,是华北其它地区所没有的。在陇县龙门洞一带为浮游型笔石—三叶虫组合,为地台边缘水较深部位沉积。

正是由于中—晚奥陶世的这种全球性大陆冰川的作用,及其所发生的一系列海水及油气地球化学作用,应将我国海相下古生界,尤其是中、上奥陶统视为寻找有效烃源岩的重点层系。

参 考 文 献

安太庠. 1987. 中国南部早古生代牙形石. 北京大学出版社, 69~82.

陈楚铭, 卢华复, 贾东等. 1999. 塔里木盆地北缘库车再生前陆褶皱逆冲带中丘里塔格前锋带的构造与油气. 地质论评, 45(4): 423~433.

- 陈能贵,杨斌. 1999. 中国南方海相地层烃源岩有机质热演化特征. 海相油气地质, 4(1):1~6.
- 葛芃芃. 1996. 杭州湾盆地油气前景. 海相油气地质, 1(2):21~25.
- 胡冰,王景斌,高振家等. 1965. 塔里木地台古生代的几个地质问题. 地质学报, 45(2):131~142.
- 黄第藩,赵孟军,张水昌. 1999. 塔里木盆地油气资源及勘探方向. 新疆石油地质, 20(3):189~192.
- 贾承造. 1997. 中国塔里木盆地构造特征与油气. 北京:石油工业出版社.
- 康玉柱. 1996. 中国塔里木盆地石油地质特征及资源评价. 北京:地质出版社, 141~151.
- 梁狄刚. 1999. 塔里木盆地油气勘探若干地质问题. 新疆石油地质, 20(3):184~188.
- 刘银河,金之钧,张一伟. 1999. 塔里木盆地轮南低隆区油源问题与运移模式. 地质论评, 45(1):37~42.
- 汤祖伟. 1996. 南方海相碳酸盐岩分布区 1994~1996 年电法勘探找油实践. 海相油气地质, 1(4):45~52.
- 王毅,熊继辉,纪友亮等. 1994. 塔里木盆地东部石炭系层序地层学研究. 地质论评, 40(增):120~125.
- 王毅,张一伟,金之钧等. 1999. 塔里木盆地构造—层序分析. 地质论评, 45(5):504~513.
- 王英华. 1991. 中、下扬子区下古生界海相碳酸盐岩成岩作用研究. 北京:科学文献出版社, 81~233.
- 杨应章. 1997. 陕西省北部奥陶纪岩石地层单位厘定. 中国区域地质, 16(2):137~143.
- 于炳松. 1996. 塔里木盆地北部古生代层序地层系统. 地质论评, 42(1):14~21.
- 张光亚,宋建国. 1998. 塔里木克拉通盆地改造对油气聚集和保存的控制. 地质论评, 44(5):511~521.
- 周志毅,陈丕基. 1990. 塔里木盆地生物地层和地质演化. 北京:科学出版社, 8~162.
- Berry W B N, Boucot A J. 1973. Glacio-eustatic control of Late Ordovician to Early Silurian platform sedimentation and faunal changes. *Geo. Soc. Am. Bull.*, 84: 275~284.
- Brenchley P J, Marshall J D, Carden G A F. 1994. Bathymetric and isotopic evidence for a short-lived Late Ordovician glaciation in a greenhouse. *Geology*, 22: 295~298.
- Chen X. 1984. Influence of the Late Ordovician glaciation on basin configuration of the Yangtz platform in China. *Lethaia*, 17: 51~60.
- Hayes J M, Popp B N, Takigikn R, et al. 1989. An isotopic study of biogeochemical relationships between carbonates and organic carbon in the Greenhorn Formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53: 2961~2972.
- Marshall J D. 1997. Global carbon isotopic events associated with mass extinction and glaciation in the Late Ordovician. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 132: 195~210.
- Qing Hairuo, Veizer J. 1994. Oxygen and carbon isotopic composition of Ordovician brachiopods: Implications for coeval seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(20): 4429~4442.
- Schidlowski M. 1988. Isotopic inferences of ancient biochemistries: carbon, sulfur, hydrogen and nitrogen. *Nature*, 333: 313~318.
- Wadleigh M A, Veizer J. 1992. $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ in Lower Paleozoic articulate brachiopods: implications for the isotopic composition of seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56: 431~443.
- Wang K, Chatterton B D E, Wang Y. 1997. An organic carbon isotope record of Late Ordovician to Early Silurian marine sedimentary rocks, Yangtz Sea, South China: Implications for CO_2 changes during the Hirnantian glaciation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 132: 147~158.

Macro-evidence of Carbon Isotopes for the Middle—Upper Ordovician Source Rocks in the Tarim Basin

Wang Darui

Key Laboratory of Petroleum Geochemistry, China National Petroleum Corporation, Beijing, 100083

Abstract

Studies of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of the marine carbonate sedimentary in four geological sections in the Tarim basin, northwest China, show an obviously positive shift, the $\delta^{13}\text{C}$ values changing from $-2\text{‰}\sim 0\text{‰}$ in the Lower Ordovician up to $+0.5\text{‰}\sim +3\text{‰}$ (PDB) in the Middle—Upper Ordovician, and the $\delta^{18}\text{O}$ values from -9‰ up to -5.5‰ for the Kalpin section of shallow water platform facies; whereas the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values from $-1\text{‰}\sim 0\text{‰}$ up to $+1\text{‰}\sim +2\text{‰}$ (PDB) and from $-9.2\text{‰}\sim -8.1\text{‰}$ up to $-6.4\text{‰}\sim -5.3\text{‰}$ respectively for the Kuruktag

section of deep water facies, corresponding in time to the major continental glaciation in Gondwana. The corresponding carbon isotopic positive excursions can be found in South China and North America, Argentina, Greenland, and some areas in Europe, including in both marine carbonate, well-preserved brachiopods, and sedimentary organic carbons.

Key words: carbon isotope; Lower Palaeozoic; source rock; Tarim basin

作 者 简 介

王大锐,男,1955年生。1982年毕业于北京大学地质系,1993年获北京大学地质系博士学位。现为中国石油天然气集团公司石油勘探开发科学研究院实验中心高级地质师,从事稳定同位素地球化学、地层学及油气地球化学研究工作。通讯地址:100083,北京学院路20号910信箱实验中心;电话:(010)62098352;传真:(010)62097414;E-mail:KLPG@riped.cnpc.com.cn。
