

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

塔里木盆地寒武纪—奥陶纪优质烃源岩沉积与古环境变化的关系:碳氧同位素新证据

张水昌^{1,2)}, R L WANG³⁾, 金之钧⁴⁾, 张宝民¹⁾, 王大锐¹⁾, 边立曾⁵⁾

1) 中石油勘探开发研究院, 北京, 100083; 2) 中石油天然气集团公司油气地球化学重点实验室, 北京, 100083; 3) Brookhaven National Laboratory, Bldg. 703, Upton, NY 11973, USA; 4) 中石化石油勘探开发研究院, 北京, 100083; 5) 南京大学地科系, 南京, 210093

内容提要:对塔里木盆地东部塔东2井上震旦统和寒武系—奥陶系样品进行 TOC 和碳、氧同位素及微量元素分析,发现该井稳定碳、氧同位素值在寒武系—中奥陶统发生明显变化,该层还赋存高有机质丰度烃源岩,其 TOC 值的高低可反映当时的生物产率和埋藏率。碳和氧同位素值在寒武系/上震旦统分界处正向漂移,说明正好在进入寒武纪前气候明显变冷,海平面下降。接着,下寒武统底部以碳和氧同位素值的快速负向漂移为标志,表明古气候迅速变暖和海平面大幅度上升,烃源岩 TOC 值也达到全井柱最高值。古气候显著波动、海平面最高及其频繁变化和沉积物高 TOC 是早寒武世的显著特征;而晚寒武世—早奥陶世,同位素正向漂移,暗示海平面下降,沉积物 TOC 也随之下降并降至最低;到了早奥陶世末,即早、中奥陶世的过渡时期,同位素又开始负向漂移,TOC 又开始升高;中奥陶世,同位素强烈负向漂移,TOC 又升至新高。稳定碳、氧同位素值的变化及其所指示的古气候与海平面变化,以及与 TOC 的响应关系,指示冰期、冰后期之交,古气候迅速变暖和海平面大幅度上升有利于烃源岩发育;同时暗示, $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 与生烃母质生物的有机生产率、有机埋藏率之间存在某种内在联系。即高 TOC 含量反映高的有机生产率和高的有机埋藏率;而与其同步反方向变化的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 则暗示海平面较高,沉积环境属远陆海域,表层水中生烃母质生物的光合作用很强。而有机质的高产率和高埋藏率,导致海水中 $\delta^{12}\text{C}$ 和 $\delta^{16}\text{O}$ 被大量地固定在沉积物中。这样,就使海水中相对富集 ^{13}C 和 ^{18}O 重同位素而使海水变“重”;而这种“重”海水,又导致了同时期浅水区碳酸盐沉积物的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显增高。

关键词: 寒武纪; 奥陶纪; 碳、氧同位素; 古气候; 烃源岩; TOC

烃源岩的形成严格受古气候、古构造、古环境的影响。其中,海平面升降和古沉积环境,对于高有机质丰度烃源岩发育至关重要,他们决定了海相沉积物的类型及其分布特点。当海平面上升时,海水向陆地侵进,海洋面积扩大而陆地面积缩小,可容纳空间增大,从而有利于烃源岩的发育;反之,则导致可容纳空间减小,从而不利于烃源岩的发育(张水昌等, 2005)。而碳氧同位素组成能够很好的反应古环境、古气候的变化(Scholle et al., 1980; Arthur et al., 1988; 陈代钊等, 1995; 田景春等, 1995; 王大锐等, 1999; Kuypers et al., 1999; 郭福生等, 2003)。

在地球的两大碳库中,无机碳主要赋存于碳酸盐岩中,有机碳则赋存于生物体和沉积有机质内。生物体内大量赋存 ^{12}C ,地史中的大规模生物群落变化势必会影响全球的碳循环。因此,如果地质历史中发

生了突发性且大范围的古环境、古生态变化,生物集群绝灭事件,或因种种原因而导致沉积有机质的保存效率发生重大改变,都可能导致全球碳循环及储存的改变,进而造成古海洋中碳酸盐沉积的碳同位素组成的重大波动。而氧同位素组成则是古海洋化学、古气候、古生态及成岩作用的综合反映。沉积岩石中的碳氧同位素组成为探索地质历史中的生物量巨变、海平面的变迁以及成岩环境提供了一种新的途径。甚至大气层 CO_2 变迁,海水的氧化度及古气温变化都和沉积物的碳氧稳定同位素组成密切相关。据前人研究,发生于白垩系的辛诺曼尼组 and 图鲁安尼组界面(C/T)的全球性海洋缺氧事件导致有机物的大量沉积,进而又导致该期无机碳酸岩和沉积有机物的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 同位素比值急剧增加。大量增加的有机物埋藏即预示着活动的大气 CO_2 被大量固定在海

注:本文为国家“973”重点基础研究项目“中国典型叠合盆地油气形成富集与分布预测”(编号 G19990433)资助的成果。

收稿日期:2005-12-23;改回日期:2006-01-22;责任编辑:郝梓国。

作者简介:张水昌,男,1961年生,博士。现为中石油勘探开发研究院教授级高级工程师,主要从事石油地质及油气地球化学研究工作。

Email:sczhang@petrochina.com.cn。

底,于是导致全球大气层中温室效应气体—— CO_2 的骤减。这一连锁反应的结果就是图鲁安尼期全球气温的明显转冷(Scholle et al., 1980; Arthur et al., 1988)。据氧同位素指示,高纬度地区的古气温在早图鲁安尼期甚至下降了 $8\sim 13^\circ\text{C}$ (Arthur et al., 1988; Jenkyns et al., 1994)。

本文的主要目的就是运用稳定碳氧同位素组成,总有机碳以及微量元素来探讨塔里木盆地古生代的沉积环境-古海洋、古气候、古生态变化,全球生物大爆发和其后的的大灭绝,以及区域性生物产率的相关性。通过对这些发生在几亿年前的重要事件的认识,不单是为了解我们所居住的这颗美丽行星的神秘的过去,而且更重要的是有助于探索烃源层的发育规律,进而对地球上的矿物燃料——油气资源分布进行重新认识。

1 地质背景

塔里木盆地东部(图1)发育巨厚的海相古生界和陆相中—新生界沉积。震旦系是塔里木盆地基底上的第一套沉积盖层,在库鲁克塔格露头厚逾5000m,总体为一套海相碎屑岩夹碳酸盐岩、火山岩的类复理石建造,特别是冰碛岩和冰水沉积相当广泛,据此可划分为三次冰期夹两次间冰期沉积。冰期沉积岩石类型主要以冰碛漂砾岩、冰碛砾岩、冰碛泥纹岩为特征,主要属海洋冰川的冰筏沉积;间冰期沉

积岩石类型以灰绿色、灰色、深灰色砂岩、泥岩夹白云质灰岩和灰岩透镜体为特征。在塔里木盆地覆盖区的塔东1、2井,分别钻揭24m和99.3m的上震旦统白云岩,据岩石地层对比,其层位可能相当于库鲁克塔格露头区的上震旦统水泉组。

寒武纪—中奥陶世属于冰后期沉积,古气候主要表现为温暖湿润与炎热干燥的交替。其中,早寒武世由于晚震旦世冰川迅速溶化与塔里木板块周缘强烈拉张裂陷的联合作用,海平面迅速升高并达到最大高海面,在塔里木盆地周缘,特别是满东地区形成一套分布广泛的欠补偿盆地相泥页岩夹碳酸盐岩沉积,并发育海底火山喷发岩建造。中寒武世可能因沉积作用而使海水变浅,满东演变为台缘缓斜坡与欠补偿浅水盆地,沉积了一套泥质泥晶灰岩与泥页岩。晚寒武世海水进一步变浅,海平面下降并降至最低,满东演变为广阔的台缘缓斜坡相,沉积灰泥丘相泥灰岩、瘤状灰岩。可见,塔东2井所在的满东地区,经历了一个早寒武世的海平面快速上升和中、晚寒武世海平面缓慢下降的完整海平面变化旋回。

早奥陶世,塔里木的沉积古地理格局基本上类似于晚寒武世,但海平面缓慢上升,古气候演变为温暖湿润,全盆地几乎不发育白云岩,更没有蒸发盐岩,满东地区自下而上经历了灰泥丘相泥灰岩到瘤状灰岩的演化。中奥陶世,为塔里木盆地早古生代的第二次高海面,满东地区几乎全为欠补偿深水盆地

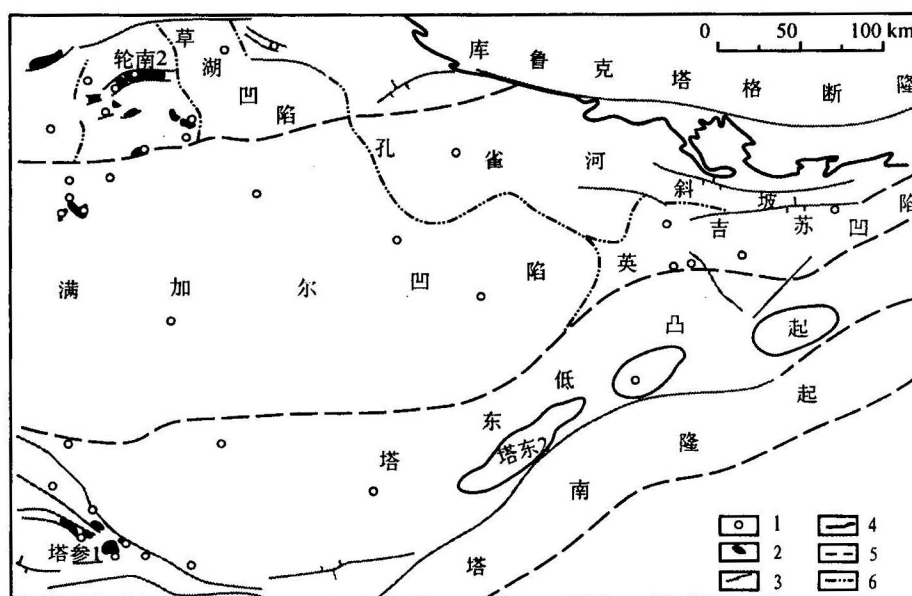


图1 塔里木盆地 TD2井井位图

Fig. 1 Map showing location of well TD2 in Tarim Basin

1—井位;2—油田;3—断层;4—盆地边界;5—一级构造单元;6—二级构造单元

1—Location of wells;2—oil field;3—fault;4—the first order structural unit;5—;6—the second order structural unit

相的黑色炭-硅泥页岩沉积(黑土凹组),其厚度在塔东1、2和英东2井分别为48m、56m和151m。晚奥陶世,沉积古地理格局发生了巨变,整个满东地区演变为超补偿盆地而接受了巨厚的陆源碎屑复理石沉积,并经历了超补偿深水→超补偿浅水→陆棚→滨岸、潮坪相的演化,其厚度在凹陷腹部最大可达6500m,塔东2井残余厚度为1678.5m。

由此可见,塔东2井所在的满东地区,经历了晚震旦世局限台地白云岩,寒武纪欠补偿浅水盆地→欠补偿深水盆地→欠补偿浅水盆地→台缘缓斜坡,奥陶纪台缘缓斜坡→欠补偿深水盆地→超补偿深水盆地→超补偿浅水盆地→台缘缓斜坡→滨岸,共3个海侵海退旋回、早寒武世和中奥陶世两次最大高海面的演化。在这些旋回中,对应于高海面期沉积的黑色、灰黑色炭-硅泥页岩,和低海面期沉积期缓斜坡相黑灰色泥灰岩、瘤状灰岩,分别构成了泥岩与碳酸盐岩优质烃源岩;而晚奥陶世超补偿盆地环境发育的巨厚陆源碎屑复理石建造中没有烃源岩发育。

2 样品与分析方法

样品采自塔东2井,在2832.5~4694m层段共

采集岩屑样品190个,其中中上奥陶统泥岩100个,下奥陶统黑土凹页岩23个,寒武系泥岩、泥灰岩、灰岩、白云岩55个,震旦系白云岩12个。对其中88块样品进行了碳酸盐岩含量分析,分布范围0.9%~99.2%,总有机碳(TOC)用美国LECO公司的CS-400碳硫测定仪测定。用稀盐酸除去无机碳的岩样在高温氧气流中燃烧,使总有机碳转化成CO₂,再经红外检测器检测并计算出总有机碳的含量。

碳、氧同位素分析采用全岩 McCrea(1950)正磷酸法,在25℃真空条件下反应24h,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($\delta^{18}\text{O}$ 值与 $\delta^{13}\text{C}$ 值), $\delta^{13}\text{C}$ 值的仪器分析误差为 $\pm 0.11\%$, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $\pm 0.12\%$,同位素值用VPDB来标定。所用工作标样为中国国家标准物质GBW-04405。基本实验流程及标准换算可参见Wang等(2002)。

元素分析:碎样至200目以下,称0.05g加入0.25g偏硼酸锂混匀,在480℃熔融,加入10%HCl定容到50ml;上机测试,采用美国Jarrel-Ash公司的ICAP9000N+1等离子光谱计,其波长范围为190~900nm,分辨率为0.036nm(一级),检测限为 10^{-9} 级,

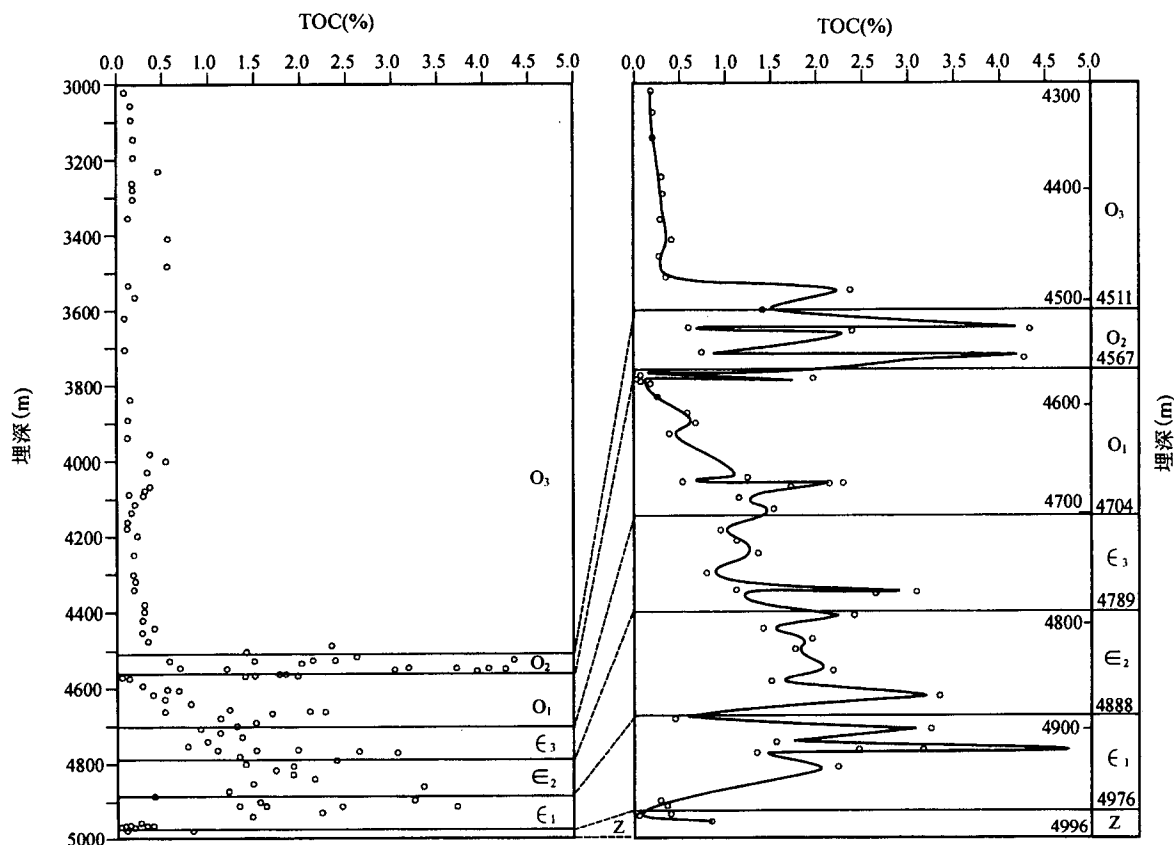


图2 塔东2井沉积物有机碳(%)分布图

Fig. 2 Distribution of total organic carbon (TOC%) of sediments from Well TD2 in Tarim Basin

固定通道50个。

3 结果与讨论

3.1 全岩有机碳含量变化

塔里木盆地 TD2井岩石样品中总有机碳与埋藏深度如图2所示。与沉积相演变的两个旋回相对应,有机质丰度的演变也出现两个旋回。高丰度烃源岩分布在旋回下部的盆地相、局限海台地相中,即中下寒武统和下中奥陶统,最高 TOC 值分别位于 4965m (10%) 和 4528.95m (7.62%) 处。第一旋回上部的上寒武统和下奥陶统灰泥丘和丘间洼地相泥灰岩、泥晶灰岩, TOC 平均含量为 0.77%, 且其中一半以上样品 TOC 小于 0.2%, 属中等和非烃源岩; 第二旋回上部的上奥陶统浊流沉积泥岩, TOC % 平均含量只有 0.16%, 一般小于 0.2%, 属非烃源岩。在这里, 我们看到了沉积环境对有机质富集和烃源岩发育的明显控制作用。

3.2 稳定碳氧同位素值 ($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$) 的变化

碳酸盐岩稳定碳和氧同位素值与埋藏深度关系如图3和图4所示。总体上, 在下寒武统至下中奥陶统富 TOC 层段, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 组成也明显偏重, 与上奥

陶统相比, ^{18}O 至少富集 3‰~6‰, ^{13}C 至少富集 5‰~10‰。不过, 从图2~4中可以看出, 即使在富有机质的层段, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 组成也有很大波动, 最明显的波动发生在早中寒武世早期和下中奥陶世, 此时也是 TOC 值相对最高的时期。而在晚寒武世和早奥陶世时期, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 组成相对比较平稳, 此时, TOC 值也是相对较低的时期。非常明显的是, 在每一个地层界限附近, 碳氧同位素组成都有一个降低的过程, 例如在震旦系向寒武系过渡时, 碳同位素值下降了约 6‰ (图3), 氧同位素值下降了约 9‰ (图4); 下奥陶统向中奥陶统的过渡, 导致碳氧同位素值的最明显降低, 尤其是氧同位素的变化十分剧烈。有意思的是, 在碳、氧同位素值每一次剧烈变化的时候, 都会导致 TOC 的增加, 随着碳氧同位素组成的稳定, TOC 值降低。

什么原因导致产生这种现象? $\delta^{13}\text{C}$ 值的快速变化为了解有机质保存机制和古海洋条件提供了有用的线索。有学者提出, 碳同位素分馏与光合固碳作用有关的溶解 CO_2 的浓度呈线性关系 (Jasper, 1991)。在光合作用加强的情况下, 初级生产力得到提高, 由于 ^{12}C 与 ^{13}C 存在质量差异, 在扩散过程中 $^{13}\text{CO}_2$ 比

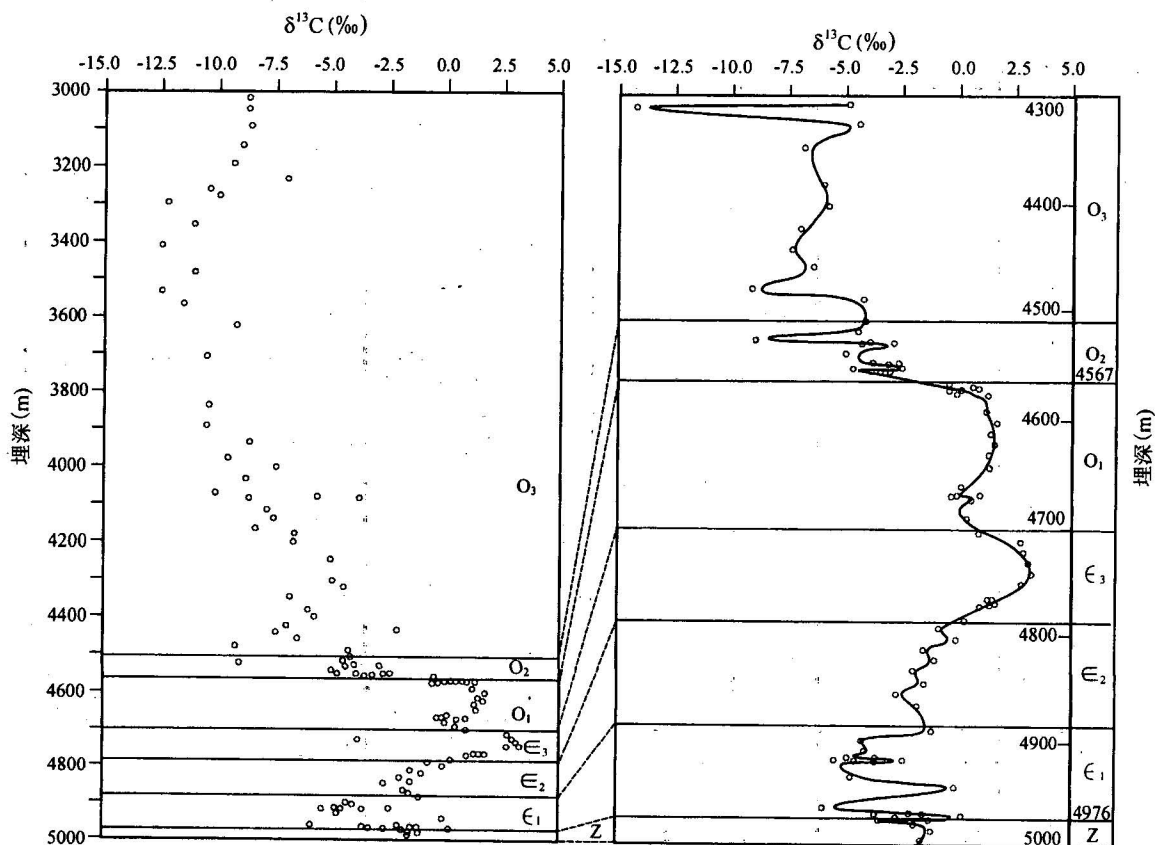


图3 塔东2井岩心碳同位素值 ($\delta^{13}\text{C}$, VPDB ‰) 分布图

Fig. 3 Distribution of carbon isotope ($\delta^{13}\text{C}$, VPDB ‰) of carbonate minerals from Well TD2 in the Tarim Basin

$^{12}\text{CO}_2$ 要慢。因此在水生光合生物在光合作用过程中,优先摄取了 ^{12}C ,而相对排斥了 ^{13}C ,造成了同位素之间的分馏(Deuser et al., 1967; O'leary, 1981)。在强的初级生产阶段,由于轻同位素的消耗,海洋中高生物产率将 ^{12}C 和 ^{16}O 选择性的转移至生物类脂中(Scholle et al., 1980; Arthur et al., 1988),重同位素在海水中更加富集,使得沉积在这种环境下的碳酸盐岩富含碳、氧重同位素。因此,碳酸盐岩中的碳和氧同位素组成因生物同位素分馏作用而变得更重(Deuser et al., 1967)。这种机理有助于解释寒武纪塔里木海的情况。早中寒武世时有机碳的高产率(TOC 从低于0.5%升至10%,图2)和高埋藏速率导致了海水中的 ^{12}C 和 ^{16}O 被生物大量吸收并被埋藏保存,同时导致海水中碳酸盐岩沉积物的 ^{13}C 和 ^{18}O 相对富集, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显增高(图3、图4)。

众所周知,寒武纪是地球生命历史上的一个重要时期,大量的后生动物首次出现在化石中(Shu et al., 1999; Bengtson, 2003)。由于在相对短的时间内呈现如此多样的生命体,所以人们将这一事件称为“寒武纪大爆发”记录(Ramskold et al., 1991; Janvier, 1999; Luo, 2004)。塔里木盆地寒武系和下中

奥陶统沉积物中富含碳、氧重同位素和高有机碳含量(图2~4),说明寒武纪时塔里木海的生物高生产率和埋藏速率。这种在寒武纪时生物产率的急剧增加显然与全球环境有关。

在早奥陶世末同位素值下降了5‰,在早奥陶世和晚寒武世之间同位素值下降了3‰(可能是寒武纪和奥陶纪的分界线),这显然与生物大灭绝事件发生的时期相一致。晚寒武世和早奥陶世之后地层的 $\delta^{13}\text{C}$ 值急剧下降了5‰,标志着 $\delta^{13}\text{C}$ 值急剧变化的时期已经结束。

早寒武世海洋生物大爆发的直接结果是 TOC 的急剧升高(图2),而其间接结果就是碳氧同位素比($\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 值)的显著升高(图3、4)。这反映了生物在对同位素分馏作用上的值的大小在很大程度上取决于环境中可利用的碳氧源的多寡。我们在这里看到的稳定同位素的剧变,正是寒武纪早期全球海洋生物大爆发的有力的同位素证据。

寒武纪末和奥陶纪早期,TOC 的急剧下降以及碳和氧同位素明显偏负(图3~5),与晚寒武世全球范围内生物灭绝事件相一致。从沉积地层剖面中可以观测到 TOC 下降了近10倍, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏负

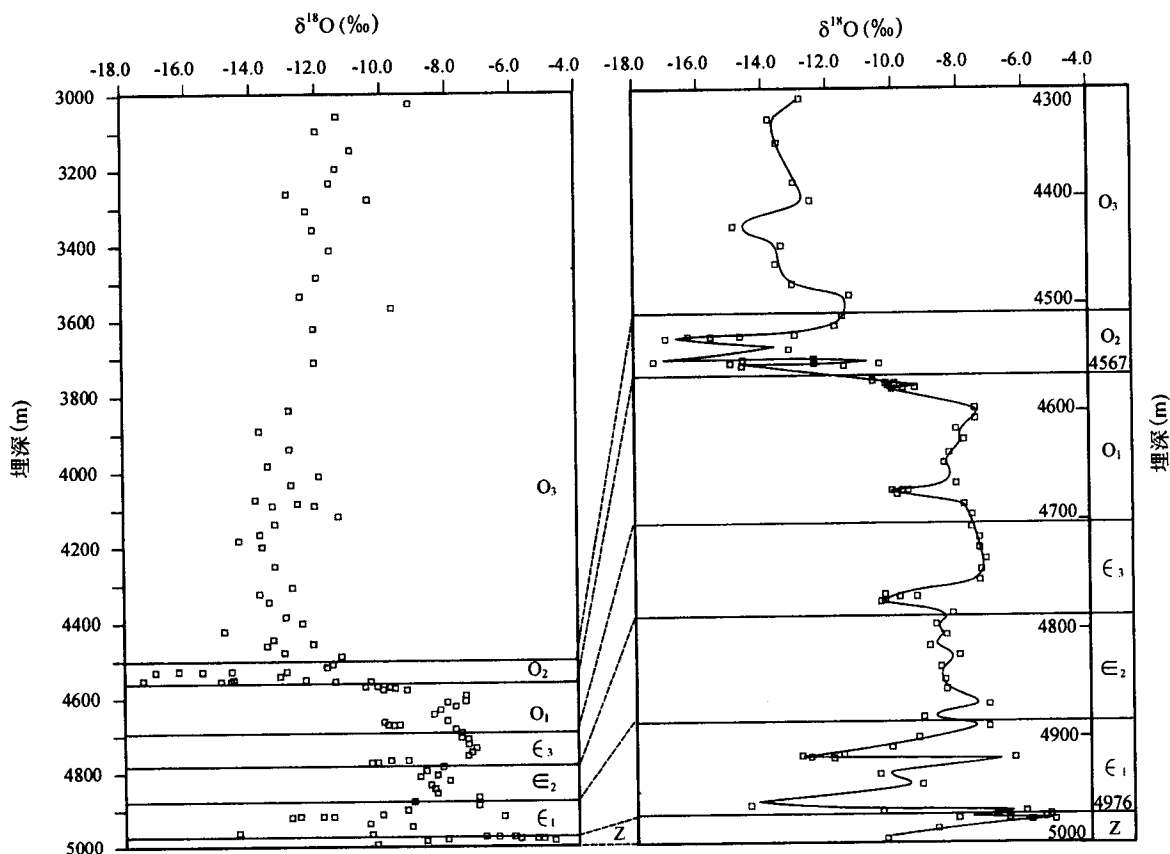


图4 塔东2井岩心氧同位素值($\delta^{18}\text{O}$, VPDB‰)分布图

Fig. 4 Distribution of oxygen isotope ($\delta^{18}\text{O}$, VPDB‰) of carbonate minerals from Well TD2 in the Tarim Basin

5‰以上((杨瑞东等,2005;李贤庆等,2005)。

同位素组成是地质时期地球演化历史的最重要记录之一。最具有挑战性的问题,就是寒武纪末期至奥陶纪早期这一时间段内有关塔里木海海平面的变化。在前寒武纪和寒武纪的分界线(TD2井约4972m处), $\delta^{18}\text{O}$ 明显降低。初步分析表明,在古生代开始时,海平面开始升高,并一直持续到中寒武世,尽管这期间存在大的升降。图5是TD2井岩石中的一些微量元素随埋深的分布。在寒武系样品中,这些元素显著富集,并且可以与 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分布曲线上同位素值的剧烈波动可对比。因此,可以认为这些同位素组成和元素含量的变化反应了海平面的波动,而海平面的变化受控于大气水(源自附近冰盾溶解的冰川水)。当然,寒武纪时塔里木海的盐度比奥陶纪时高很多。图6中每一个偶数事件段可能代表了低海平面和高盐度。相反,每一个奇数事件段代表低(更负)同位素比值和低微量元素含量,表明这一时期有更多的大气水注入,大气中的 CO_2 的浓度 p_{CO_2} 可能也比较高(Jasper et al., 1990; Leuenberger et al., 1992)。

图6中事件段可以用来确定前寒武纪至中奥陶世的古环境特征。奇数段(1,3,5...29)反应了重同位素被消耗而富轻同位素(^{12}C 和 ^{16}O),偶数段(2,4,6...28)以重同位素为特征,即富含较重同位素。

碳、氧稳定同位素组成升至最大值($\delta^{13}\text{C} = +2.5\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -6\text{‰}$, 图6第2段),表明可能存在海平面的急剧下降。这样一个急剧的变化可能与气候急剧变冷和冰川的出现有关(如 Stigman et al., 2000)。从前寒武纪至寒武纪,有机碳含量和碳酸盐岩的同位素组成有一个偏负的明显变化,尤其是氧同位素降低很多, $\Delta = -9\text{‰}$,即从前寒武纪分界线约4972m(见图6第2段)处的一5‰下降到早寒武世(第3段)的一14.5‰。海相沉积物稳定氧同位素的大幅降低,表征环境的明显变化,可能是水温或海平面的变化,我们认为最有可能的是海平面升高,由于气候突然变暖,从冰盖融化的冰川水大量注入到“内海”——塔里木海中。

在碳和氧同位素值升高的同时,我们也观察到,在TD2井约4950m或第6段(图6)处,TOC值也达到最高。因此同位素值升高的部分原因可能是由于高生物产率优先消耗掉海水中的较轻的同位素所致。因此它与海平面波动一起,导致了稳定碳同位素值的剧烈增加(图6,第2、4、6、8、18和20段)。

4 结论

塔里木盆地海相沉积物稳定碳、氧同位素值的明显变化发生在早古生代。碳和氧同位素值在前寒武纪和寒武纪分界处正移,说明正好在进入寒武纪

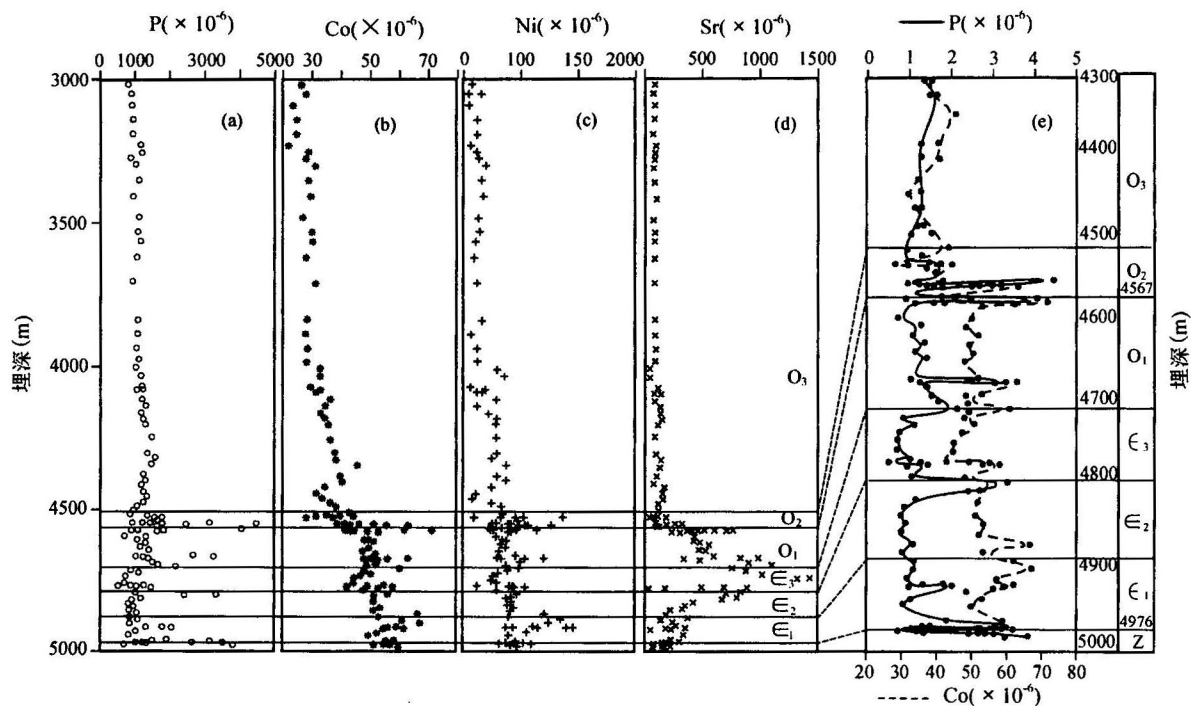


图5 塔东2井岩心微量元素含量分布图($\times 10^{-6}$)

Fig. 5 Distribution of trace elements ($\times 10^{-6}$) in cores from Well TD2 in the Tarim Basin

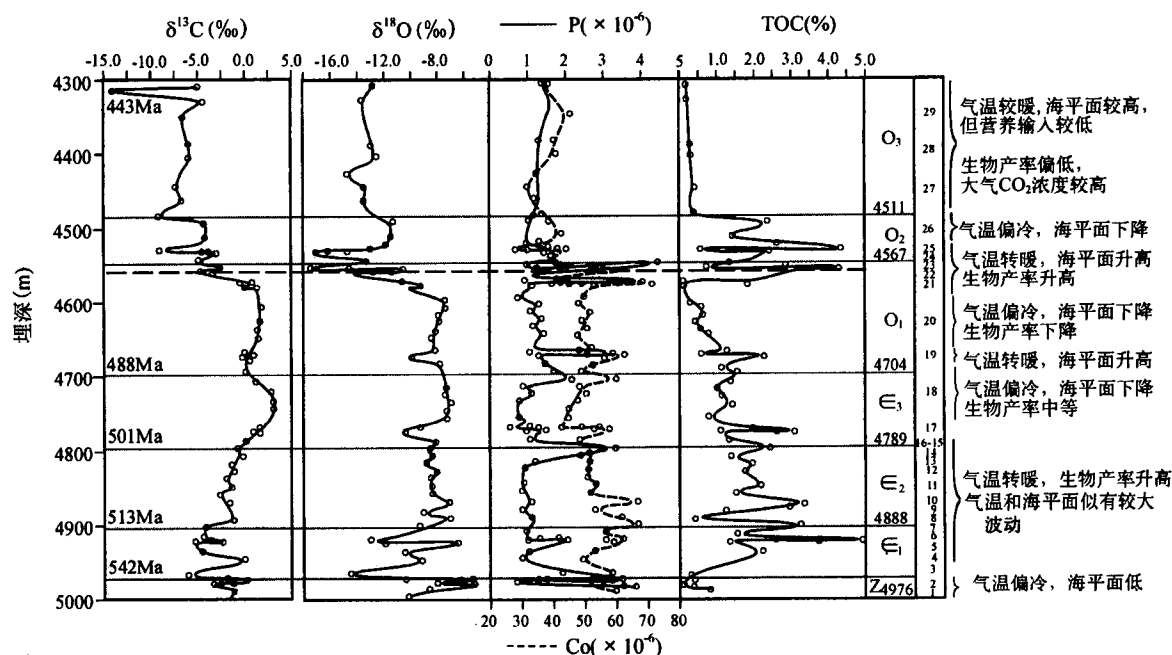


图6 塔东2井碳酸盐岩碳和氧稳定同位素($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$, VPDB‰)和沉积物总有机碳(TOC)的分布图

Fig. 6 Distribution of carbon and oxygen stable isotope values ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$, in ‰ VPDB) of carbonate and total organic carbon (TOC) of sediments from Well TD2

数字1~29代表沉积岩心层段,便于文中讨论;总体沉积环境判断是根据图中柱子显示的地质数据得出的

P—phosphorus; Co—cobalt; numbers 1~29 are the sub-units of sedimentary core used to simplify the discussion in the text

前气候明显变冷,海平面下降。接着,寒武纪或古生代开始以碳和氧同位素值的快速负向漂移为标志,表明气候迅速变暖和海平面大规模上升。大气水的大量输入可能是导致这些沉积物的同位素值变负的主要原因。早寒武世时适宜的气候条件、大气氧含量的增加等因素为早寒武世生物大爆发提供了首要条件。寒武纪高生物产率与高保存率也可以从明显较高的TOC值上反映出来。气候的显著波动和海平面的变化是早、中寒武世的显著特征,而晚寒武世则是这一地区气候和海平面相对稳定的一个时期,这个时期的大多数时候可能由于气候变冷,海平面严重下降,大气水补给有限和生物产率中等,这些古环境条件导致了海水中碳、氧轻同位素的严重消耗。到了寒武纪末、寒武纪向奥陶纪过渡时期,海水中的同位素组成强烈负移(如 $\delta^{18}\text{O} \approx -14\text{‰}$)。TOC量开始下降,然后在早奥陶世又升至新高(从 $<0.5\%$ 到 $\sim 5\%$),表明生物生产率(和保存率)的提高。所有这些证据表明气候条件开始变好,气温上升,来自附近冰盾中大量的融化水不仅带来了淡水,还有营养物的注入,这为又一个生物大爆发和油源层的形成创造

了适宜的环境条件。

参 考 文 献

- 陈代钊,陈其英,江茂生. 1995. 泥盆纪海相碳酸盐岩碳同位素组成及演变. 岩相古地理, 15(5): 22~28.
- 郭福生,彭花明,潘家永等. 2003. 浙江江山寒武系碳酸盐岩碳氧同位素特征及其古环境意义探讨. 地层学杂志, 27(4): 289~297.
- 李贤庆,肖贤明,米敬奎,等. 2005. 塔里木盆地库车坳陷烃源岩生成甲烷的动力学参数及其应用. 地质学报, 79(1): 133~144.
- 田景春,曾允孚. 1995. 贵州二叠系海相碳酸盐岩碳、氧同位素地球化学演化规律. 成都理工学院学报, 22(1): 78~82.
- 王大锐,白玉雷. 1999. 碳酸盐岩中稳定同位素对古气候的表征. 石油勘探与开发, 26(5): 30~32.
- 杨瑞东,朱立军,王世杰,等. 2005a. 贵州寒武系底部碳同位素负异常的地层学和生物学意义. 地质学报, 79(2): 157~165.
- 张水昌,张宝民,边立曾,等. 2005. 中国海相烃源岩发育控制因素. 地学前缘, 12(3): 39~48.
- Arthur M A, Dean W E, Pratt L M. 1988. Geochemical and climatic effects of increased marine organic carbon burial at the Cenomanian/Turonian boundary. Nature, 335, 714~717.
- Bengtson S. 2003. What was life on Earth like before the Cambrian explosion? Nature, 423, 481~482.
- Deuser W G, Degens E T. 1967. Carbon isotope fractionation in the system $\text{CO}_2(\text{gas})-\text{CO}_2(\text{aqueous})-\text{HCO}_3^-(\text{aqueous})$. Nature, 215: 21~22.
- Janvier P. 1999. Catching the first fish. Nature, 402, 21~22.
- Jasper J P, Hayes J M. 1990. A carbon isotope record of CO_2 levels

- during the late Quaternary. *Nature*, 347, 462~464.
- Jenkyns H C, Gale A S, Corfield R M. 1994. Carbon- and oxygen-isotope stratigraphy of the English Chalk and Italian Scaglia and its palaeoclimatic significance. *Geol. Mag.* 131, 1~34.
- Kuyppers M M, Pancost R D, Jaap S, Sinninghe Damsté J S. 1999. A large and abrupt fall in atmospheric CO₂ concentration during cretaceous times. *Nature*, 399, 342~345.
- Leuenberger M, Siegenthaler U, Langway C C. 1992. Carbon isotope composition of atmospheric CO₂ during the last ice age from an Antarctic ice core. *Nature*, 357: 488~490.
- Luo Z. 2004. A window on early animal evolution. *Nature*, 430, 405.
- Rozanski K L, Araguas R Gonfiantini. 1992. Relation between long-term trends of oxygen — 18 isotope composition of precipitation and climate. *Science*, 258, 981~985.
- O'leary M H. 1981. Carbon isotope fractionation in plants. *Phytochemistry*, 20 (4), 553~567.
- Ramskold L, Hou X. 1991. New early Cambrian animal and onychophoran affinities of enigmatic metazoans. *Nature*, 351, 225~228.
- Shu D G, Luo H L, Conway Morris S, Zhang X L, Hu S X, Chen L, Han J, Zhu M, Li Y, Chen L Z. 1999. Lower Cambrian vertebrates from south China Beneath the great divide. *Nature*, 402, 42~46.
- Stigman D M, Boyle E A. 2000. Glacial/interglacial variations in atmospheric carbon dioxide. *Nature*, 407, 859~869.
- Scholle P A, Arthur M A. 1980. Carbon isotope fluctuations in Cretaceous pelagic limestones: potential stratigraphic and petroleum exploration tool. *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol.*, 64, 67~87.
- Wang R L, Scarpitta S C, Zhang S C, Zheng M P. 2002. Later Pleistocene/Holocene climate conditions of Qing-Zang (Tibetan) Plateau inferred from stable isotopes of Zabuye Lake. *Earth and Planetary Science Letters*, 203, 461~477.

The Relationship Between the Cambrian—Ordovician High-TOC Source Rock Development and Paleoenvironment Variations in the Tarim Basin, Western China: Carbon and Oxygen Isotope Evidence

ZHANG Shuichang^{1,2)}, WANG Ruiliang³⁾, JIN Zhijun⁴⁾, ZHANG Baomin¹⁾, WANG Darui¹⁾, BIAN Lizeng⁵⁾

1) *PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing, 100083;* 2) *CNPC Key Laboratory of Petroleum Geochemistry, Beijing, 100083;* 3) *Brookhaven National Laboratory, Bldg. 703, Upton, NY 11973, USA;*

4) *Exploration & Development Research Institute, Sinopec, Beijing, 100083;* 5) *Dept of Geosciences, Nanjing University, Nanjing, 210093*

Abstract

Sedimentary elemental and isotopic records of seawater and its isotopic composition are the most promising recorders of the history of this planet on geological time scale. The Tarim basin of northwestern China contains thick marine Cambrian—Ordovician sediments. Stable carbon and oxygen isotope values of these sediments from the basin show that dramatic changes occurred in Early Paleozoic. Drastic positive shift of carbon and oxygen isotopes at the boundary of Precambrian and Cambrian suggests a remarkable cooling and drop of sea level occurred right before the transition. Then the beginning of Cambrian or Paleozoic is marked by a rapid negative shift of both carbon and oxygen isotope values, suggesting a rapid warming of climate and large scale rise of sea level. Drastic input of meteoric water is perhaps the major cause of the decrease of isotope values in these sediments. Optimal climatic conditions of Early Cambrian provided a premier condition for the biological exploration of Early Cambrian. Enhanced bioproduction in Cambrian is shown also by the significantly higher TOC data. Severe fluctuation of climate and sea level change as well as high TOC values marked the Early and Middle Cambrian. Later Cambrian and early Ordovician is probably a rather stable period of time regarding the climate and sea level in the region. By the end of early Ordovician and the transition of Early to Middle Ordovician, isotope signals are characterized by severe negative shift. TOC raised to the new high in the Middle Ordovician (from <0.5% to ~5%), suggesting elevated bioproduction (and preservation). These lines of evidence all suggest an enhanced climate condition. Large volume of melted water from the nearby ice sheet brought in not only fresh water, but also nutrient thus providing an optimum environment for another bio-explosion and optimum condition of oil source formation.

Key words: Cambrian; Ordovician; stable carbon and oxygen isotope; Paleo-climate; TOC