

doi: 10.12029/gc20220617

高达,王明敏,陶叶,黄理力,孙春燕,黄鑫森,武建伟. 2022. 塔中地区良里塔格组海平面变化对高频层序和沉积演化的控制[J]. 中国地质, 49(6): 1936–1950.

Gao Da, Wang Mingmin, Tao Ye, Huang Lili, Sun Chunyan, Huang Xinmiao, Wu Jianwei. 2022. Control of sea level changes on high-frequency sequence and sedimentary evolution of Lianglitage Formation in the Tazhong Area[J]. Geology in China, 49(6): 1936–1950(in Chinese with English abstract).

## 塔中地区良里塔格组海平面变化对高频层序和沉积演化的控制

高达<sup>1,2</sup>,王明敏<sup>3,4</sup>,陶叶<sup>1,2</sup>,黄理力<sup>5</sup>,孙春燕<sup>6</sup>,黄鑫森<sup>1,2</sup>,武建伟<sup>1,2</sup>

(1. 长江大学地球科学学院,湖北 武汉 430100;2. 油气资源与勘探技术教育部重点实验室,湖北 武汉 430100;3. 中国科学院南海海洋研究所,广东 广州 510301;4. 中国科学院大学,北京 100049;5. 中国石油杭州地质研究院,浙江 杭州 310023;6. 中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院,新疆 库尔勒 841000)

**提要:**【研究目的】碳酸盐岩地层易受海平面变化影响而发育高频层序,但是反映海平面变化的地化指标的精度不足,导致高频层序对海平面振荡的响应认识不够深入,高频海平面变化对台地边缘礁滩沉积的高频层序和沉积演化的控制尚不明确。【研究方法】论文研究选取塔里木盆地塔中地区某钻井的上奥陶统良里塔格组连续取心资料,通过密集取样开展微相分析和碳、氧同位素测试分析。【研究结果】该井良里塔格组中上部发育 7 种微相类型,沉积演化分析表明良里塔格组沉积中—晚期,沉积环境由潮坪向生物礁—颗粒滩再到较深水的开阔台地演化。碳、氧同位素测试显示  $\delta^{13}\text{C}$  为 0.5993‰~1.6228‰(均值 1.139‰),  $\delta^{18}\text{O}$  值为 -8.3608‰~-5.1452‰(均值为 -6.790‰);  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  的振荡变化与微相变化和沉积旋回对应良好。古海洋条件分析表明,良里塔格组沉积时期气候温热,礁、滩体发育层段样品的古温度值最高,代表着高的碳酸盐产率;Z 值所反映的古盐度在底部潮坪沉积段最高,在高频旋回的顶部古盐度均明显减小,指示可能存在大气淡水的影响。与塔北地区南缘和巴楚地区的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  存在一定差异,主要受控于沉积环境和古水深。【结论】良里塔格组中—上部存在至少 3 个完整的海平面升降变化周期,内部又包括至少 2 个次级周期;不同级别的海平面振荡主要受古气候变化驱动,并控制了高频层序的发育。海平面先缓慢上升再持续稳定或小规模振荡,是连续厚层的生物碎屑和砂屑颗粒滩沉积发育的有利条件;良里塔格组沉积晚期海平面快速上升,沉积环境向滩间洼地和较深水的开阔台地转变。在高频层序顶部海平面的小规模下降导致的早期岩溶作用是礁滩体储层质量改善的重要因素。

**关键词:**碳、氧同位素;礁滩相;海平面变化;碳酸盐岩微相;高频层序;良里塔格组;奥陶系;油气勘查工程

**创新点:**(1)基于钻井岩心高密度取样开展的碳、氧同位素测试分析,揭示了受古气候变化控制的高频海平面升降控制了浅水碳酸盐岩礁滩型高频层序;(2)阐明了海平面缓慢上升再相对稳定,是连续厚层的生物碎屑和砂屑颗粒滩沉积发育的有利条件,并利于礁滩体早期岩溶的发育。

中图分类号:P618.13 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2022)06-1936-15

## Control of sea level changes on high-frequency sequence and sedimentary evolution of Lianglitage Formation in the Tazhong Area

收稿日期:2021-08-22;改回日期:2021-11-07

基金项目:国家自然科学基金(41502104)、湖北省自然科学基金(2017CFB533)和油气资源与勘探技术教育部重点实验室开放基金(K2018-06)联合资助。

作者简介:高达,男,1988年生,博士,副教授,主要从事沉积学和层序地层学的教学和研究工作;E-mail: gaoda18@gmail.com。

通讯作者:王明敏,女,1998年生,博士生,主要从事海洋地质学与地球化学方面的研究;E-mail: wangmingmin20@mails.ucas.ac.cn。

GAO Da<sup>1,2</sup>, WANG Mingmin<sup>3,4</sup>, TAO Ye<sup>1,2</sup>, HUANG Lili<sup>5</sup>,  
SUN Chunyan<sup>6</sup>, HUANG Xinmiao<sup>1,2</sup>, WU Jianwei<sup>1,2</sup>

(1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, Hubei, China; 2. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan 430100, Hubei, China; 3. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, Guangdong, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China; 6. Research Institute of Petroleum Exploration and production, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla 841000, Xinjiang, China)

**Abstract:** This paper is the result of oil and gas exploration engineering.

**[Objective]** Carbonate strata are susceptible to sea-level changes and thus develop high-frequency sequences. However, the accuracy of geochemical indicators reflecting sea-level changes is insufficient, resulting in poor understanding about the high-frequency sea-level fluctuation. The controls of sea-level changes on the high-frequency sequence and sedimentary evolution of the platform-margin reef-shoal deposits remain unclear. **[Methods]** Continuous core data from a well in the Upper Ordovician Lianglitage Formation in the Tarim Basin were selected for microfacies analysis, carbon and oxygen isotope analyses by densely-collected samples. **[Results]** Seven microfacies types developed in the middle and upper part of Lianglitage Formation. The analysis of the sedimentary evolution shows that the sedimentary environment evolved from tidal flat to reef and shoal, and to deeper platform during the middle to late period of deposition. The carbon and oxygen isotope values ranges from:  $\delta^{13}\text{C}$  is 0.5993 ‰ – 1.6228 ‰ (average 1.139 ‰) and  $\delta^{18}\text{O}$  value is –8.3608 ‰ – –5.1452 ‰ (average –6.790 ‰). The changes of the  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  correspond well with the evolution of microfacies and sedimentary cycles. The analysis of paleo-ocean conditions shows that the Lianglitage Formation was deposited under warm climate and the reef and shoal samples recorded high paleo-temperature, representing a high rate of carbonate production. The paleo-salinity reflected by the Z-value is high according to the samples at the bottom of the tidal flat, and it is relatively low at the top of high-frequency cycles, probably indicating the influence of meteoric water. The range of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values differ from the Tazhong area, the southern margin of Tabei area, and Bachu area, which is mainly related to the difference in environment and water depth. **[Conclusions]** At least three cycles of sea-level change and two secondary cycles exist in the middle to upper parts of the Lianglitage Formation. Different levels of sea-level changes are mainly driven by paleoclimate changes that control the formation of high-frequency sequences. Sea level rises slowly and then continues to be stable or oscillate on a small scale, which provide a favorable condition for the deposition and development of thick-bedded bioclasts and carbonate sands. Sea level rose sharply during the late sedimentary period of the Lianglitage Formation, and the sedimentary environment turned into inter-shoal lagoons and deeper platforms. The early-stage karstification caused by the small-scale sea-level drop at the top of the high-frequency sequence is an important factor to improve the reservoir quality of reef and shoal faces.

**Key words:** carbon and oxygen isotope; reef and shoal facies; sea level changes; carbonate microfacies; high-frequency sequence; Lianglitage Formation; Ordovician; oil and gas exploration engineering

**Highlights:** (1) Based on carbon and isotope analysis of densely-collected samples from cores of wells, it is revealed that the high-frequency sea-level fluctuation dominated by the paleoclimate change controls the shallow water carbonate reef beach type high-frequency sequence; (2) Sea level rises slowly and then continues to be stable or oscillate on a small scale, which provide a favorable condition for the deposition and development of thick-bedded bioclasts and carbonate sands and further promote the early-stage karstification of reef-shoal complex.

**About the first author:** GAO Da, male, born in 1988, doctor, associate professor, mainly engaged in teaching and researching of sedimentology and sequence stratigraphy; E-mail: gaoda18@gmail.com.

**About the corresponding author:** WANG Mingmin, female, born in 1998, doctor candidate, mainly engaged in marine geology and geochemistry; E-mail: wangmingmin20@mails.ucas.ac.cn.

**Fund support:** Supported by National Natural Science Foundation of China (No.41502104); Natural Science Foundation of Hubei Province (No.2017CFB533); the Open Fund of Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources (Yangtze University), Ministry of Education (No.K-2018-06).

# 1 引 言

碳酸盐台地边缘通常具有复杂的沉积构成;同时,受古气候和海平面升降的高频振荡的影响,沉积微相在横向迁移和垂向交替十分频繁,形成多样的微相组合和沉积层序(赵宗举等,2010;刘嘉庆等,2010;赵宗举,2015;高达等,2016;付坤荣等,2018;任大伟等,2018;Zhang et al.,2019)。特别是由于台缘带礁和滩等沉积通常构成有利的油气储层,关于其控制因素和发育规律的研究既是重点又是难点(罗平等,2008;赵文智等,2014)。晚奥陶世,塔里木盆地处于20°S~10°N的亚热带—热带(方大钧和沈忠悦,2001),塔中—巴楚地区和塔北地区均发育典型的浅水碳酸盐岩台地(刘嘉庆等,2012;马德波等,2019)(图1)。在塔中I号断裂带发育典型的镶边型台地,台缘礁滩相构成了区内重要的油气储层(张丽娟等,2007;高达等,2013;屈海洲,2014)。关于良里塔格组沉积演化、高频层序及海平面变化等方面,前人开展了深入的研究(张丽娟等,2007;高志勇等,2007;韩剑发等,2011;高达等,2013;林畅松等,2013;屈海洲,2014;郝彦珍等,2015)。阐明高频海平面变化对礁滩体沉积高频层

序的控制,对于预测礁滩相储层具有重要意义。然而,受钻井取样密度的限制,依据地球化学指标开展的高频海平面变化和古海洋条件研究不足,对礁滩相高频沉积层序的海平面变化响应认识不够深入。

论文利用位于塔中I号断裂带附近TZ-X井连续取心,开展精细的微相分析和密集取样的碳、氧同位素测试,在高频沉积层序分析的基础上,结合碳、氧同位素所指示的海平面及古海洋条件变化,综合分析海平面变化对高频沉积层序和礁滩体沉积演化的控制。研究成果将对深化碳酸盐岩高频沉积层序对海平面变化的响应认识,并对建立礁滩体沉积的预测模型具有重要意义。

# 2 区域地质概况

塔里木盆地是一个由古生界克拉通盆地和中、新生界前陆盆地组成的大型叠合复合盆地,具有古老陆壳基底和多次沉降隆升的复杂构造演化史(贾承造,1999)。中—晚奥陶世,中央古隆起带和塔北隆起及其内部的地貌单元控制着盆地内部发育塔北台地、巴楚—塔中台地和塘南台地等3个浅水碳酸盐台地及台地边缘礁滩相的发育(林畅松等,

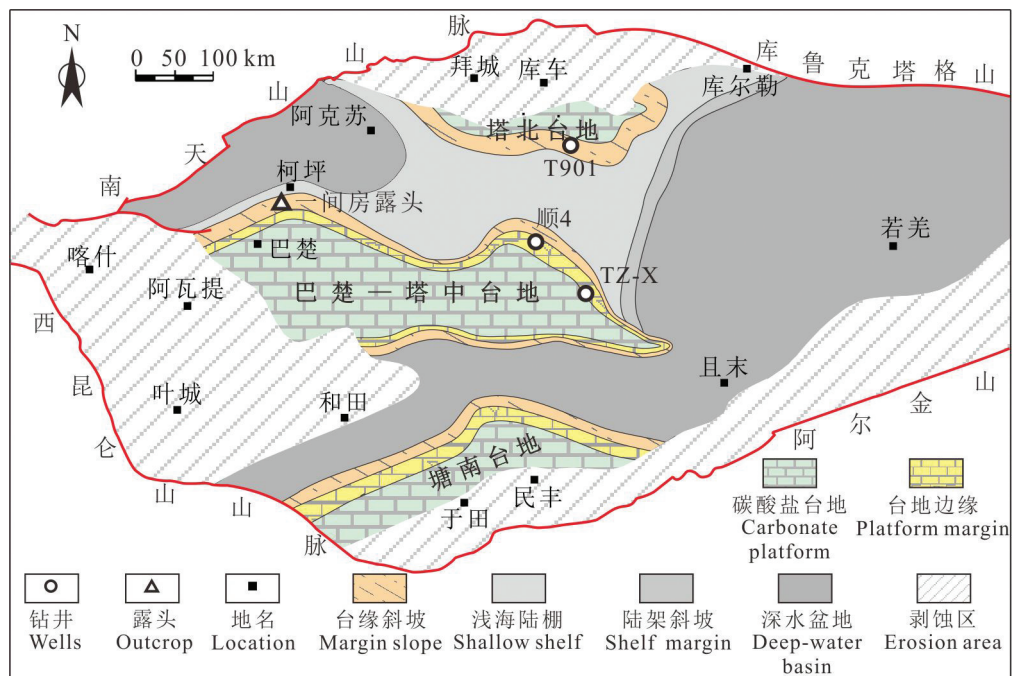


图1 塔里木盆地晚奥陶世良里塔格组沉积期岩相古地理和碳酸盐台地边缘分布(据林畅松等,2013修改)  
 Fig.1 Lithofacies palaeogeography and carbonate platform margins in the depositional period of the Lianglitage Formation in the Late Ordovician of the Tarim Basin (after Lin Changsong et al., 2013)



2009)。塔中地区上奥陶统良里塔格组从下到上可细分为含泥灰岩、颗粒灰岩、泥质条带灰岩段3个岩性段(杨海军等,2000)。良里塔格组沉积期,塔中隆起北缘表现为镶边型台地,沿I号断裂带台地边缘的结构表现出分带差异性(何碧竹等,2009),向沉积晚期台缘礁滩体的镶边程度不断变高(刘嘉庆等,2010;屈海洲等,2014)。塔北地区良里塔格组沉积期以发育宽缓台地边缘为特征,主要为弱镶边-缓坡型,沉积晚期台地边缘发育颗粒滩和滩间洼地沉积组合为特征(赵学钦等,2014;马德波等,2019)。巴楚地区良里塔格组沉积期以发育宽缓的台地边缘或缓坡边缘为特征,主要发育外缓坡-开阔台地-台地边缘沉积(赵宗举等,2010;牛君等,2016)。

### 3 沉积特征与沉积演化

样品取自塔中地区TZ-X井中上部的密集取心段,大约1 m选取1个样品,总计85个岩心样品制作85个薄片,根据岩石结构、颗粒类型及特征、生物化石特征等差异,划分出7种主要的微相类型(图2),解释了它们指示的沉积环境。结合测井曲线特征,分析了良里塔格组沉积晚期的高频层序与沉积演化。

#### 3.1 微相特征及沉积环境解释

##### 3.1.1 含黏土绿藻粒泥灰岩

特征:该微相以泥晶基质为主,含黑褐色黏土纹层(图2a)。发育相对完整的绿藻类和苔藓虫生物化石,以及少量海百合、腕足和三叶虫等生物碎屑。绿藻个体大小0.5~1.5 mm,苔藓虫个体可达3~4 mm。该微相分布于良里塔格组的顶部,自然伽马测井值(GR)明显高于下部地层。

解释:以泥晶为基质和发育黏土质纹层反映沉积水动力弱,保存较完整且较大的底栖钙藻和苔藓虫指示水循环良好的开阔海环境,沉积环境为位于正常浪基面以下的开阔台地。

##### 3.1.2 海百合核形石砾状灰岩/礁灰岩

特征:该微相以超过2 mm的砾状颗粒支撑,颗粒间几乎全部为亮晶方解石胶结(图2b、c)。颗粒类型主要为直径>2 mm的核形石及海百合碎屑,其次为保存完好的砂级大小的苔藓虫及绿藻和介形虫碎屑。核形石和苔藓虫化石个体通常,约占颗粒的40%,其他生物碎屑主要为0.5~1.25 mm,通常呈

次圆状。该微相发育于该井的4964.4~4971.3 m,下部发育生屑粒泥灰岩微相。

解释:保存较好的生物化石和较高生物碎屑比例共同反映与生物礁有关的环境,较粗的粒径与不含泥晶基质反映受强烈的波浪和潮汐作用影响的持续高能水动力背景,位于生物礁的侧缘。

##### 3.1.3 生屑粒泥灰岩

特征:该微相以泥晶基质为主,各种生物颗粒(15%~30%)散布在基质中(图2d)。颗粒包括少量腹足、介形虫和苔藓虫等完整的生物化石,和海百合、绿藻、腕足、双壳、三叶虫等生物碎屑。生屑的分选较差,磨圆中等。该微相分布于礁灰岩微相的下部(4971.4~5011.0 m),GR曲线呈中低值弱齿化,垂向连续厚度大。

解释:分选和磨圆程度不高、泥晶基质比例高反映水动力弱,丰富的生物碎屑指示位于生物礁和滩之间的相对低洼的开阔海,沉积环境为滩间洼地。

##### 3.1.4 绿藻海百合泥粒灰岩

特征:该微相为颗粒支撑,颗粒含量>70%,粒间主要为泥晶基质及少量亮晶(图2e)。颗粒主要为海百合碎屑,其次为绿藻及少量腕足、介形虫碎屑,分选中等-较差,磨圆度主要为次圆-一次棱,粒径主要分布在0.2~1 mm。该微相厚度薄(5012.8~5016.5 m),向上过渡为生屑粒泥灰岩微相。

解释:颗粒支撑及一定的分选和磨圆程度共同反映受中等-较强的波浪和潮汐等水动力影响,沉积环境为临近生物礁的生物碎屑滩。

##### 3.1.5 含生物砾屑泥粒灰岩

特征:该微相颗粒支撑,颗粒含量>70%,粒间部分为亮晶、部分为泥晶基质(图2f、g)。颗粒包括分选和磨圆程度较高的似球粒(粒径0.2~0.5 mm)、绿藻和海百合生物碎屑(粒径0.5~1 mm)及少量个体>2 mm的砾屑和生物化石。在5017.4~5036.6 m连续发育,GR值较低。该段下部绿藻和海百合等生物碎屑含量多,向上部生屑含量减少,似球粒含量明显增加。

解释:颗粒支撑及较好的分选和磨圆程度共同反映受高能的波浪和潮汐等水动力的影响,反映颗粒滩的沉积环境。

##### 3.1.6 生屑似球粒泥粒-颗粒灰岩

描述:该微相以分选好、磨圆程度高的似球粒

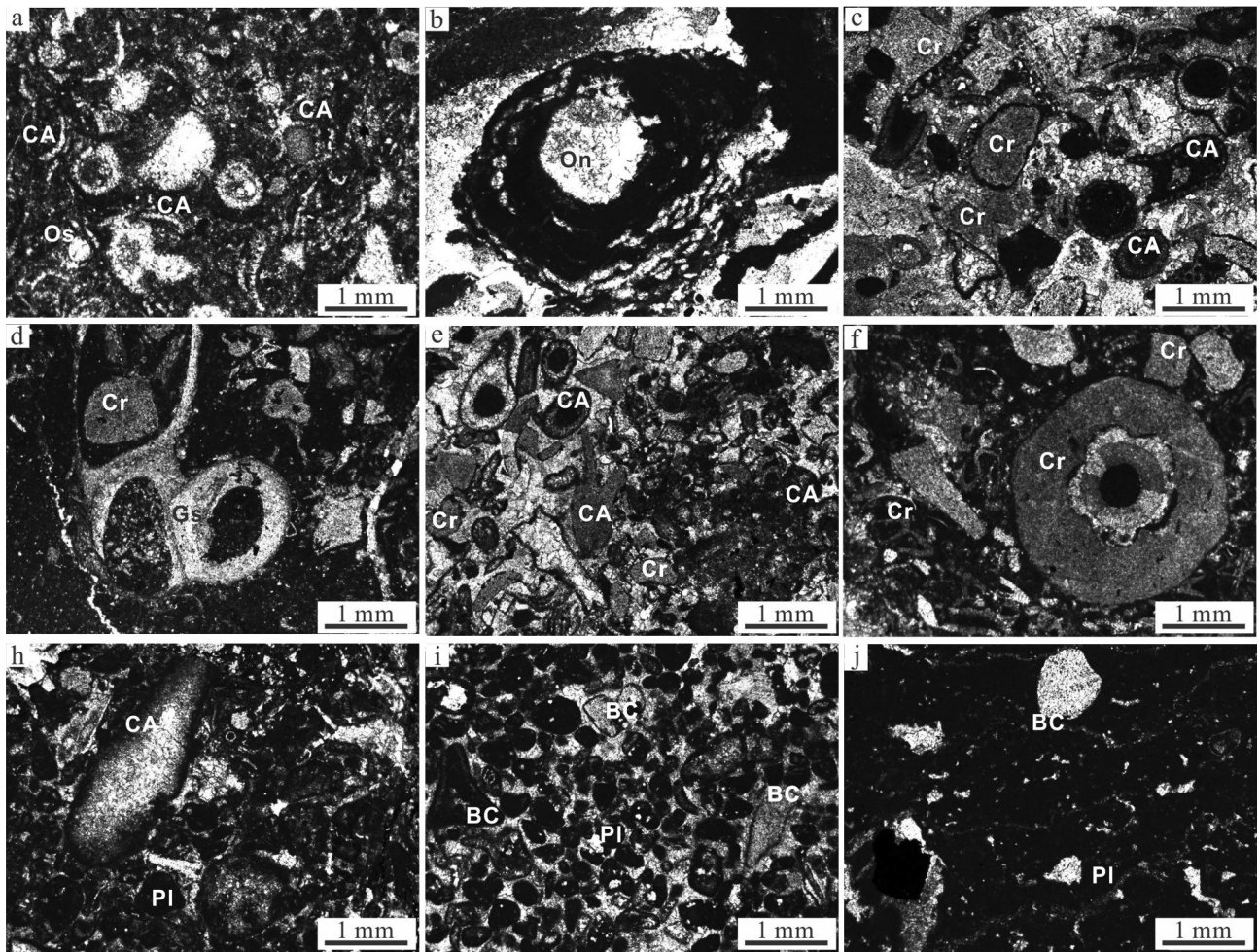


图2 塔中地区TZ-X井良里塔格组典型微相特征

a—含黏土绿藻粒泥灰岩微相(MF1), 4926.8 m; b—海百合核形石砾屑灰岩/礁灰岩微相(MF2), 4969.7 m; c—海百合核形石砾屑灰岩/礁灰岩微相(MF2), 4969.7 m; d—生屑粒泥灰岩微相(MF3), 4971.4 m; e—绿藻海百合泥粒灰岩微相(MF4), 5012.8 m; f—含生物砾屑的似球粒生屑泥粒灰岩微相(MF5), 5014.8 m; g—含生物砾屑的似球粒生屑泥粒灰岩微相(MF5), 5034.7 m; h—生屑似球粒泥粒-颗粒灰岩微相(MF6), 5035.0 m; i—窗格孔/鸟眼孔粒泥-泥粒灰岩微相(MF7), 5085.3 m。BC—生物碎屑; Bv—双壳; CA—钙藻; Cr—海百合; Gs—腹足; On—核形石; Os—介形虫; PI—球粒

Fig.2 Typical microfacies characteristics of Lianglitage Formation in TZ-X well in Tazhong area

a—Green-algae wackestone with clay (MF1), 4926.8 m; b—Crinoid and oncolite rudstone/reef limestone (MF2), 4969.7 m; c—Crinoid and oncolite rudstone/reef limestone (MF2), 4969.7 m; d—Bioclast wackestone (MF3), 4971.4 m; e—Green-algae and crinoid packstone (MF4), 5012.8 m; f—Peloid and bioclast packstone with bioclast breccia (MF5), 5014.8 m; g—Peloid and bioclast packstone with bioclast breccia (MF5), 5034.7 m; h—Bioclast and peloid packstone to grainstone (MF6), 5035.0 m; i—Fenestra/bird-eye wackestone to packstone (MF7), 5085.3 m。BC—Bioclast; Bv—Bivalve; CA—Calcareous algae; Cr—Crinoid; Gs—Gastropod; On—Oncoid; Os—Ostracod; PI—Peloid.

颗粒支撑为特征, 颗粒含量 > 70%, 粒径 0.2~0.5 mm (图2h)。此外还可见少量海百合、绿藻和介形虫生物碎屑。在 5037~5061.5 m 连续发育, GR 曲线呈极低值箱型。

解释: 高的结构成熟度受强的波浪和潮汐等水动力作用持续影响, 表明沉积环境为高能颗粒滩。

### 3.1.7 窗格孔粒泥-泥粒灰岩

特征: 该微相以密集发育鸟眼孔或窗格孔构造

为特征(图2i, j)。颗粒比例 25%~55%, 成分大多为似球粒, 可见少量个体完整的苔藓虫化石(粒径 1~1.5 cm)及绿藻、海百合和介形虫等生物碎屑。近似平行的球粒纹层间可见波状起伏的微细黏土和细粉砂质纹层。在 5084~5093 m 连续发育, GR 曲线以中值齿化为特征。

解释: 窗格孔或鸟眼孔的普遍发育指示间歇性暴露的环境, 岩性主要为粒泥灰岩-泥粒灰岩表明受潮



汐影响的交替的水动力,沉积环境解释为潮间带。

### 3.2 沉积演化

在定性的微相分析基础上,在薄片统计了各种颗粒的相对丰度,特别注意了各类生物化石在薄片中所占比例,这些信息对于沉积环境解释和沉积演化分析十分重要(荣辉等,2010; Ji et al., 2018; 高达等,2021)。良里塔格组中上部发育至少3个四级层序(由下至上分别为SQ1、SQ2和SQ3),每个层序的厚度为40~50 m,四级层序内部主要以砂屑滩、生屑滩和生物礁组合形成沉积旋回为特征(图3)。高达等(2013, 2016)通过大量岩心和薄片标定以及通过基于测井曲线的小波变换,识别了塔中地区良里塔格组台地边缘的四级层序并建立了层序地层格架。与之对比发现,TZ-X钻井中的四级层序规模与沉积构成和邻区的塔中82、塔中30、塔中24等钻井层序发育特征十分接近。

研究层段的底部以发育窗格孔粒泥-泥粒灰岩为主,反映水浅且频繁暴露的潮坪环境,主要为潮间带上部。SQ1位于5012~5062 m,总体为颗粒含量较高且类型丰富的颗粒滩环境,沉积环境为水动力强的潮间带下部—潮下带上部,反映一次小规模的海侵后的以浅滩为主的沉积层序。在该层序内部又可识别出2个五级层序,内部均由滩体颗粒成分和生物碎屑含量规律变化指示水动力和水深的差异。下部的五级层序以生屑似球粒泥粒-颗粒灰岩为主,颗粒比例向上增多;上部的五级层序底部为含生物砾屑泥粒灰岩,指示水体加深、水动力减弱,向上海百合、绿藻等生物碎屑含量升高,且内碎屑含量增多,反映向上水体变浅、水动力增强。SQ2位于4960~5012 m,下部以发育生屑粒泥灰岩为主,沉积环境突变为滩间洼地,反映向上可容空间增大、沉积水体加深;在4960~4970 m处,以海百合核形石砾状灰岩/礁灰岩为主,沉积环境为生物礁的侧缘,指示适宜生物生长的透光的浅水环境。SQ3位于顶部,岩相以含黏土绿藻粒泥灰岩为主,较低的颗粒含量、大量的泥晶基质和单一的绿藻类的化石共同反映开阔台地环境,与下部层序相比沉积水体的加深和水动力减弱,指示明显的海侵。GR曲线表现出漏斗形和箱形的交替叠置,反映受水深和水动力控制的陆源碎屑黏土含量周期性变化,据此可进一步划分为3个五级层序。

总体上,该井所在的区域在良里塔格组沉积晚期以台地边缘—开阔台地生物礁和颗粒滩沉积交互为特征,沉积演化具有明显的规律性。在底部的潮坪环境之上,先发育以似球粒为主的颗粒滩沉积,生物化石含量较少;随后绿藻类和海百合类增多,反映底栖生物在适宜的条件下更为繁盛,颗粒滩中保存的生物化石明显增多。向上演化为以生屑泥粒灰岩为主的礁滩间洼地沉积和以各种原地生物沉积为主的礁和生物滩沉积交互为主。良里塔格组沉积晚期,生物礁和颗粒滩总体不发育,以开阔台地低能沉积为主。

## 4 碳氧同位素测试与结果

### 4.1 取样与测试方法

在上述85个薄片样品观察基础上,镜下观察结合手标配观察挑选出未发生白云岩化、溶蚀、重结晶、交代、裂缝及方解石脉、热液改造等作用的岩石样品61个,选取新鲜岩石用研钵研磨,使用200目筛后得到样品粉末(质量>5 g/个)用于碳、氧同位素测试。测试在长江大学地球科学学院实验中心完成,实验仪器为德国Thermo Fisher Scientific公司生产的DELTA V Advantage气体同位素质谱仪,实验方法为磷酸法。测试使用的标样为IAEA-CO-8方解石,测试结果采用PDB标准。该批样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 测定值的标准偏差为 $\pm 0.02\text{‰}$ ,测试结果的散点分布如图4。

### 4.2 原始性评估

保存在原始碳酸盐沉积物中的碳、氧同位素会受成岩作用、外源流体、生物作用等多因素的影响,因此在利用碳酸盐岩的碳、氧同位素来分析沉积期的古海洋及古海平面条件时,需要对样品的原始性进行评估。通常 $\delta^{18}\text{O}$ 对成岩蚀变作用反应灵敏,大气淡水和热液作用通常造成 $\delta^{18}\text{O}$ 负偏,许多研究通常将 $< -10\text{‰}$ 作为 $\delta^{18}\text{O}$ 值受到明显的成岩作用影响而不再适宜用于原始沉积条件分析的判别标准(Kaufman and Knoll, 1995; 郑仰帝和蔡进功, 2013; 王传尚等, 2014; 梁文君等, 2015)。测试的 $\delta^{18}\text{O}$ 范围为 $-5.1452\text{‰} \sim -8.3608\text{‰}$ ,平均值为 $-6.7905\text{‰}$ ,认为数据基本满足海水古环境分析的要求。此外,碳和氧同位素的相关性可以判断成岩蚀变程度,通常随着成岩蚀变增强, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的相关性越好

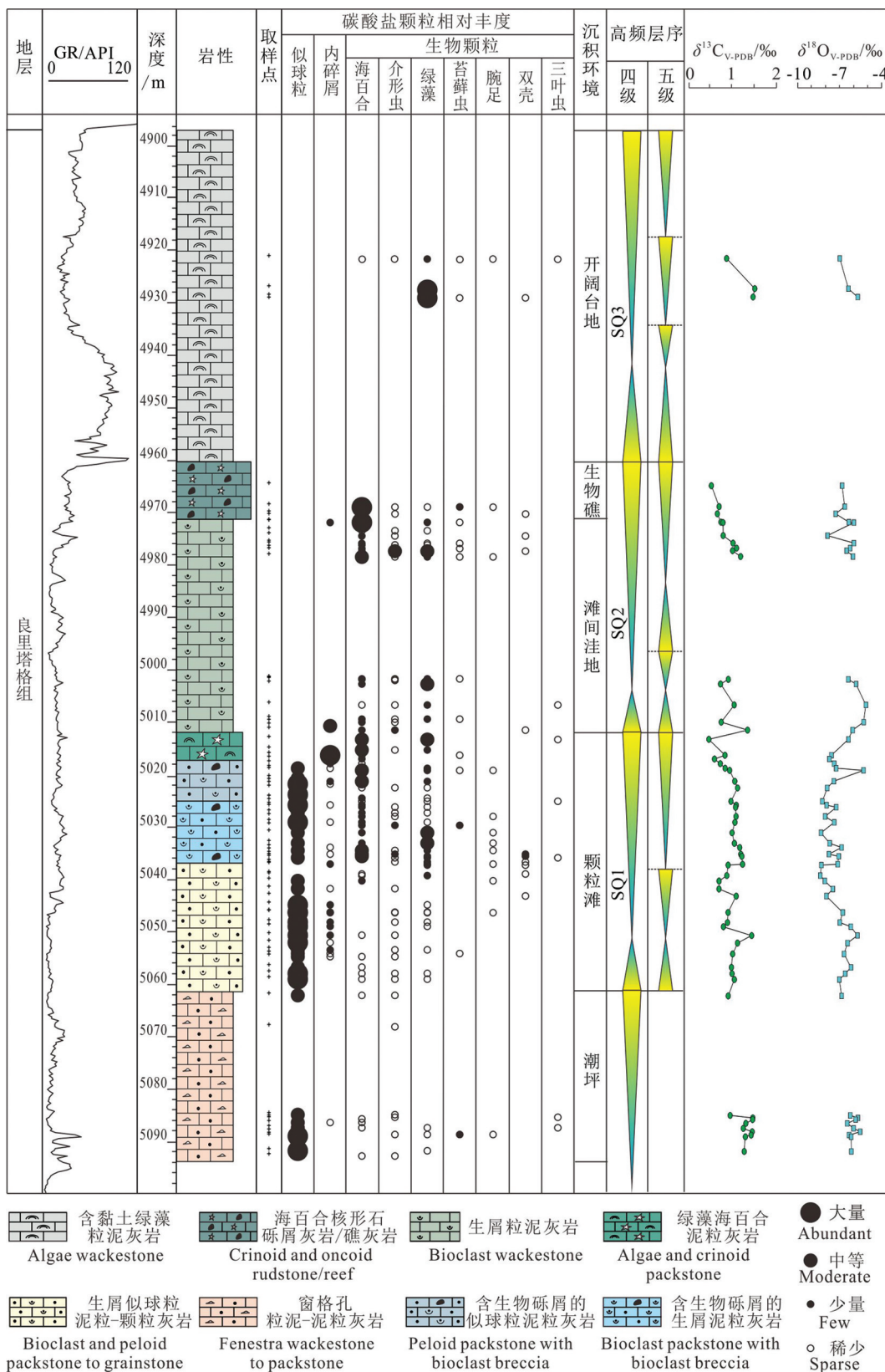


图3 塔中地区TZ-X井良里塔格组沉积微相和碳、氧同位素特征综合柱状图

Fig.3 Sedimentary microfacies and carbon and oxygen isotope characteristics of the Lianglitage Formation in Well TZ-X in Tazhong area

(Qing and Veizer, 1994; 刘嘉庆等, 2010)。本次实验中  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  整体呈离散特征, 相关系数仅为 0.0074。同时, 岩心和薄片观察也未发现明显的溶蚀和重结晶等现象。总体上反映本次实验样品受到成岩作用和蚀变影响程度较小, 基本保存了原始沉积物的碳氧同位素组成, 能满足古环境分析要求。

#### 4.3 碳同位素特征

良里塔格组  $\delta^{13}\text{C}$  值在 0.5993‰~1.6228‰ 内变化, 平均值为 1.139‰。5084~5091 m 段,  $\delta^{13}\text{C}$  明显大于平均值, 整体岩性为窗格孔粒泥-泥粒灰岩。5038~5062 m,  $\delta^{13}\text{C}$  表现出一个先增大后减小的旋回, 该段岩性为生屑似球粒泥粒-颗粒灰岩。在其之上  $\delta^{13}\text{C}$  随岩性的变化而突然增大, 5013~5037 m 段  $\delta^{13}\text{C}$  先稳定后明显减小。在 5011 m 随岩性突变为生屑粒泥灰岩,  $\delta^{13}\text{C}$  突增为 1.4619‰, 5011~5001 m 段逐渐减小。4978~4964 m 段  $\delta^{13}\text{C}$  持续减小至 0.6539‰, 岩性为海百合核形石砾屑灰岩。4928~4921 m 段  $\delta^{13}\text{C}$  也呈减小趋势, 该段岩性为含黏土绿藻粒泥灰岩。

#### 4.4 氧同位素特征

良里塔格组  $\delta^{18}\text{O}$  值变化区间为 -8.3608‰~-5.1452‰, 平均值为 -6.790‰。5084~5091 m 段  $\delta^{18}\text{O}$  均高于平均值, 该段岩性为窗格孔粒泥-泥粒灰岩。5038~5062 m 段  $\delta^{18}\text{O}$  总体呈现先增大后减小的变化旋回, 在 5056 m 处达到极大值 -6.1972‰, 至

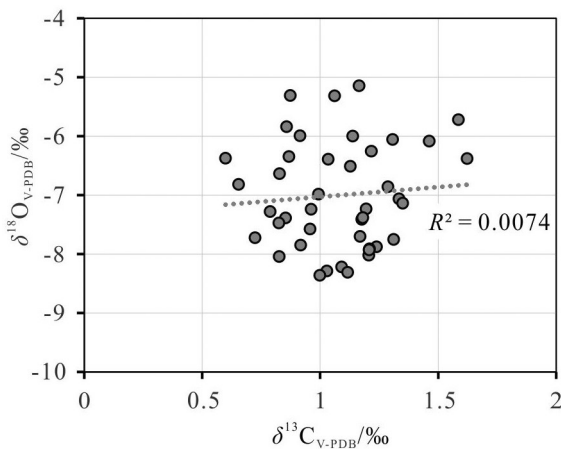


图4 塔中地区TZ-X井良里塔格组碳、氧同位素数据分布散点图

Fig.4 Scatter plot of carbon and oxygen isotope data distribution of the Lianglitage Formation in Well TZ-X in Tazhong area

5038 m  $\delta^{18}\text{O}$  减小至极小值 -8.0391‰, 该段岩性为生屑似球粒泥粒-颗粒灰岩。5017~5038 m 段  $\delta^{18}\text{O}$  较为波动, 总体略低于平均值。5001~5017 m 随岩性突变为绿藻海百合泥粒灰岩,  $\delta^{18}\text{O}$  存在先增大后减小的旋回。4964~4978 m,  $\delta^{18}\text{O}$  值总体呈减小趋势, 内部存在多次震荡。4928~4921 m 段  $\delta^{18}\text{O}$  值呈减小趋势, 岩性为含黏土绿藻粒泥灰岩。

## 5 古海洋条件分析

### 5.1 古温度

利用  $\delta^{18}\text{O}$  值计算古海水温度通常使用的经验公式(张秀莲, 1985)为:

$$t = 15.976 - 4.2 \times \delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3} + 0.13 \times (\delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3} + 0.22)^2$$

公式中, 温度  $t$  的单位为  $^{\circ}\text{C}$ 。一般认为, 该公式应用在中生代以后的样品较为有效。对于中生代之前的样品, 需要对  $\delta^{18}\text{O}$  进行“年代效应”校正以减弱成岩作用  $\delta^{18}\text{O}$  的影响(邵龙义, 1994)。在使用该公式之前, 首先将测得的良里塔格组样品的  $\delta^{18}\text{O}$  (平均值 -6.787‰) 校正到相当于第四纪海相碳酸盐岩样品的  $\delta^{18}\text{O}$  (平均值 -1.2‰), 再利用以上公式求得塔中地区良里塔格组沉积期古海水温度。

总体上, 良里塔格组沉积时期海水温度平均值为 21.232 $^{\circ}\text{C}$ , 分布范围在 14.16~28.46  $^{\circ}\text{C}$ 。古温度变化曲线与  $\delta^{18}\text{O}$  曲线大体呈相反变化趋势(表 1, 图 5)。5084~5091 m, 良里塔格组沉积期古温度均略低于平均值; 5047~5062 m 段古温度与总体古温度平均值接近, 向上到 5016 m 整体的海水古温度明显增加且高于平均值。5001~5013 m 温度总体明显降低至平均值以下, 岩性也明显突变。4978~4964 m 段平均值为与总体平均值接近, 4928~4921 m 段平均温度比总体平均温度略低。

古温度计算值反映热带-亚热带海水温度, 这与前人通过地磁恢复得出该时期塔里木板块处于赤道附近的认识相呼应(方大钧和沈忠悦, 2001)。同时, 古温度的变化和生物丰度、碳酸盐颗

表 1 塔中地区 TZ-X 井良里塔格组古温度和 Z 值数据  
Table 1 Paleotemperature, paleo-salinity (Z value) data of the Lianglitage Formation in Well TZ-X in Tazhong area

	最大值	最小值	平均值
$t/^{\circ}\text{C}$	28.457	14.163	21.232
Z 值	130.523	127.721	129.035



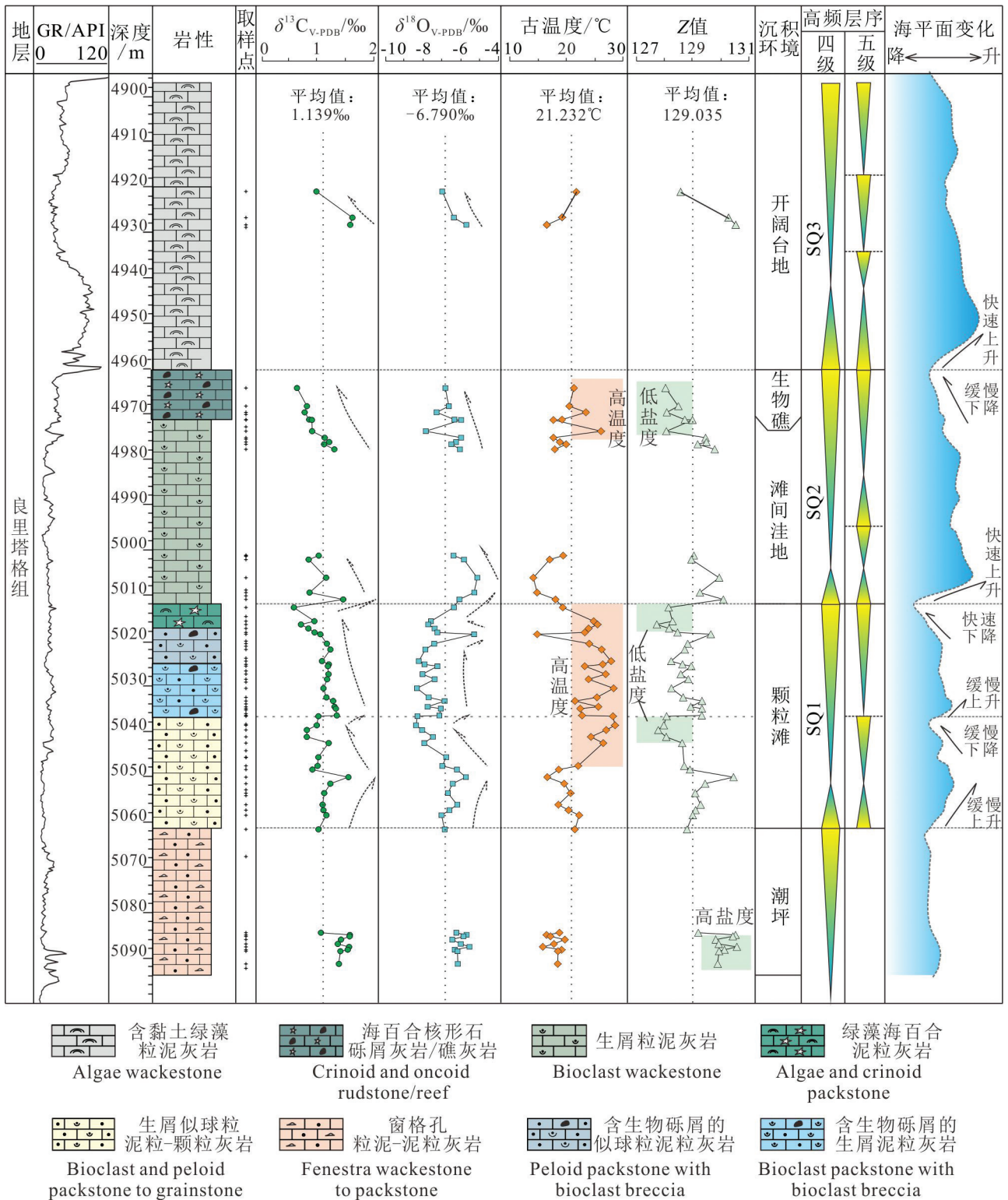


图5 塔中地区TZ-X井良里塔格组沉积晚期古海洋条件和海平面变化综合柱状图  
 Fig.5 Paleoceanic conditions and sea level changes during the deposition of the Lianglitage Formation in Well TZ-X in Tazhong Area

粒的发育程度变化有对应关系,如5016~5047 m段岩石以各种类型颗粒和生物碎屑为主,说明其具备适应生物繁盛的良好条件和高的碳酸盐生产率,这与该段计算的古温度值最高值相符;古温度的低值段(如5084~5091 m和5001~5013 m)通常生物发育较少、颗粒类型单一,说明该段沉积期碳酸盐生产率降低。

## 5.2 古盐度

海水的盐度与 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 都有关联,Keith and Weber(1964)提出利用石灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值来区分侏罗纪及时代更晚一些的海相石灰岩和陆相淡水石灰岩的公式:

$$Z=2.048\times(\delta^{13}\text{C}+50)+0.498\times(\delta^{18}\text{O}+50)$$

认为 $Z>120$ 指示海相石灰岩, $Z<120$ 时为淡水石灰岩。这一公式现已广泛地应用于中国元古界—古生界碳酸盐岩地层的古盐度分析,均取得了很好的效果(张秀莲,1985;郑仰帝和蔡进功,2013;罗贝维等,2013)。本文通过该方法研究塔里木盆地中部良里塔格组沉积期古海水盐度的变化情况。

研究区良里塔格组 $Z$ 值均大于120,分布范围在127.721~130.523,平均 $Z$ 值为129.035,指示完全的海相环境(表1) $Z$ 值的变化趋势与 $\delta^{18}\text{O}$ 相似,5081~5091 m的 $Z$ 值明显高于平均值,5001~5062 m总体 $Z$ 值与平均值接近,4964~4978 m段和4928~4921 m段 $Z$ 值呈减小趋势(图5)。

$Z$ 值能通过反映海水盐度变化指示海水循环和局限性。如5081~5091 m总体 $Z$ 值较大,结合着连续稳定的鸟眼孔粒泥—泥粒灰岩岩性段,共同反映沉积水体局限和盐度上升。5012~5062 m总体 $Z$ 值较低,结合丰富的颗粒含量和较高的生物丰度,以及推算的较高的古温度,共同反映适应生物生长的正常开阔的热带浅海环境。同时,5013 m以上和4978~4964 m段的明显的 $Z$ 值变化同时伴随着岩性的变化,可能指示着古气候和古海平面的变化。

## 5.3 与邻区奥陶系的对比

通过与前人发表的塔里木盆地不同地区奥陶系碳氧同位素数据对比分析,讨论了塔中地区中一晚奥陶世古海洋条件的差异,以及与盆内其他台地同沉积期古海洋条件的差异(图6)。

与位于塔中I号断裂带西北缘的顺4井良里塔格组的碳氧同位素数据(刘存革等,2016)相比, $\delta^{18}\text{O}$

和 $\delta^{13}\text{C}$ 散点的分布范围绝大部分是重叠的。证明受塔中I号断裂带控制的台地边缘带沉积环境和古海洋条件是一致的。与塔北地区的T901井良里塔格组的碳氧同位素数据相比(刘存革等,2016), $\delta^{18}\text{O}$ 范围十分接近,塔中地区良里塔格组 $\delta^{13}\text{C}$ 表现出略微负偏。这种差异可能是由沉积环境差异造成的,塔北地区良里塔格组沉积期为相对深水的缓坡环境(刘嘉庆等,2010),与塔中台地边缘环境相比,沉积水深更大且水动力更弱,都更有利于有机质的保存和有机碳的埋藏富集。与巴楚地区奥陶系碳氧同位素数据(赵国伟,2013)相比, $\delta^{18}\text{O}$ 范围总体十分接近, $\delta^{13}\text{C}$ 比巴楚地区一间房组整体高出约1‰,但比巴楚地区良里塔格组低1‰~1.5‰。良里塔格组 $\delta^{13}\text{C}$ 与一间房组 $\delta^{13}\text{C}$ 相比具有明显正偏,在巴楚露头区和柯坪露头区均有揭示(赵国伟,2013;赵宗举,2015),反映了晚奥陶世早期的海平面明显上升。良里塔格组沉积期塔中地区的 $\delta^{13}\text{C}$ 明显比巴楚地区良里塔格组 $\delta^{13}\text{C}$ 偏负,主要可能是受到沉积环境差异的控制。巴楚地区良里塔格组沉积相以较深水斜坡/外缓坡为主(赵宗举,2015),与塔中地区同期的浅水台地边缘相比更容易保存富有机质沉积,从而导致 $\delta^{13}\text{C}$ 明显正偏。

## 6 良里塔格组海平面变化对沉积演化及储层发育的控制

### 6.1 沉积期高频海平面及古海洋条件变化

在古老碳酸盐中,氧同位素则易受到成岩作用叠印影响,从而造成难以恢复原始沉积海水信息。区内的 $\delta^{18}\text{O}$ 主体位于-5.1452‰~-8.3608‰,且与巴楚和塔北地区的 $\delta^{18}\text{O}$ 范围接近,共同说明受到一定成岩作用的影响,不适宜进行海平面变化的分析。碳同位素受到成岩作用的影响相对氧同位素来说较小,因此多用于古老年代碳酸盐岩地层的海平面分析。在海平面上升期,生物有机碳的埋藏量增加,而古陆氧化面积减少,因剥蚀而带入海洋的有机碳显著减少,这样溶于海水中的二氧化碳富 $^{13}\text{C}$ ,此时与海水相平衡的碳酸盐也富 $^{13}\text{C}$ ,即 $\delta^{13}\text{C}$ 值增高(李儒峰和刘本培,1996;李玉成,1998;王传尚等,2014;梁文君等,2015);反之,在海平面下降期,大陆面积增大,由于氧化剥蚀进入海洋的有机碳的数量增加,加之还有其中的生物作用减弱,这

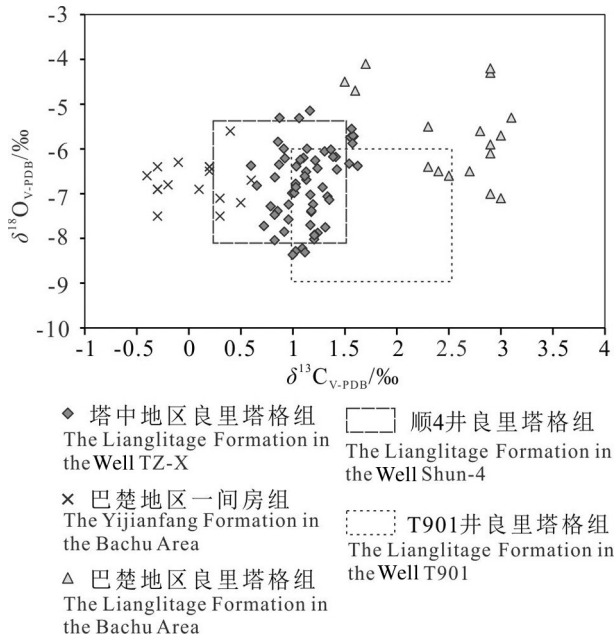


图6 塔中地区TZ-X井良里塔格组与盆地其他地区奥陶系碳、氧同位素分布差异

Fig.6 Differences in the distribution of carbon and oxygen isotopes between the Lianglitage Formation in TZ-X well and the Ordovician in the other areas of the basin

样海相碳酸盐岩的 $\delta^{13}C$ 值降低(Baud et al., 1989)。据此,可以通过碳同位素的变化反映古海平面的变化规律,特别是在碳酸盐高频层序中, $\delta^{13}C$ 的变重通常指示高频海平面上升和沉积水深增加,沉积速度变缓; $\delta^{13}C$ 的变轻通常指示高频海平面下降和/或准同生期大气淡水的影响。

总体上,TZ-X井良里塔格组样品 $\delta^{13}C$ 显示出至少2个较完整的 $\delta^{13}C$ 由正漂至负漂的变化旋回。第1个旋回位于5013~5062 m,海平面变化表现为先缓慢上升、到小规模振荡、到持续稳定、到快速下降的变化规律,该旋回内部存在2个次级海平面变化旋回,均表现为先上升后下降。该旋回沉积期古温度开始缓慢上升到稳定较高,在顶部表现出快速下降的趋势。Z值存在两个明显降低趋势,并与海平面下降过程相对应,指示海水受到大气淡水的影响。第2个旋回从5013 m开始, $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 的明显正偏和Z值的突然增加,反映海平面上升、沉积水深增加,同时古盐度趋于正常,古温度开始缓慢上升。向第2个旋回的顶部4963~4978 m, $\delta^{13}C$ 明显负偏的趋势反映着海平面的下降,同时Z值也显著下降反映水体盐度下降,可能是大气淡水混合的影响。

### 6.2 海平面变化对高频沉积旋回的控制

结合沉积环境演化分析和海平面与古海洋条件变化分析,发现良里塔格组沉积晚期的高频层序明显受到海平面升降变化的控制。同时,碳、氧同位素的分析还表明,这种高频海平面振荡主要是由古气候周期变化所驱动的(张江勇等,2020;张艺璇等,2022)。

SQ1总体上是在下部的潮坪之上发育的颗粒滩沉积,反映相对海平面的上升和可容纳空间的增大。下部 $\delta^{13}C$ 的逐渐略微增大指示着海平面的缓慢上升,Z值指示沉积水体以开阔海为主。古温度明显上升并持续处于较高值,促进两极冰川的消融,推测是海平面上升主要因素。这些条件都能促进碳酸盐产率增高,利于形成厚层的高能砂屑-生屑滩。在SQ1顶部, $\delta^{13}C$ 的大幅快速减小指示着海平面的快速下降,Z值明显减小和 $\delta^{18}O$ 的明显负偏指示着可能存在的大气淡水透镜体,古温度的急速下降与两极冰川的生长和海平面下降密切相关。这些条件共同造成生物的衰落和碳酸盐沉积速率的明显降低,导致颗粒滩沉积的停止。并且,在5037 m存在一个明显的 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 小规模负偏移,古温度和Z值也有明显的减小,这些是次一级的海平面升降控制的。综合分析表明,海平面先缓慢上升、后小规模振荡或持续稳定,加之古温度较高的沉积背景,是砂屑和生屑颗粒滩沉积的连续发育的重要控制因素。

SQ2亦由 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 的快速明显增大的反映的海平面快速上升为起始,Z值的突然增加反映水体快速恢复为正常开阔海环境,古温度逐渐升高,此时沉积水深较大,水动力不强,以滩间洼地沉积为特征。在层序的上部,随着古温度的上升和水体的变浅,适宜大量生物繁殖,沉积了连续的海百合核形石砾屑灰岩。SQ1顶部 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 的持续负漂移和Z值持续减小,均指示着海平面缓慢下降,生物礁沉积趋缓。在该层序的上部,GR值突然明显增大和岩相突变为含黏土绿藻粒泥灰岩,共同指示水体快速加深和可容纳空间快速增大,沉积环境突变为较深水的开阔台地环境。这种快速的海平面上升不利于礁滩体的发育,沉积环境向滩间洼地和开阔台地转变。

### 6.3 海平面变化对有利储层发育的控制

海平面变化和层序地层分析共同说明良里塔



格组的生物礁、颗粒滩等沉积主要发育在海平面缓慢上升之后的持续稳定期。此时可容纳空间快速消耗,沉积水深不断变浅,在高频层序界面附近伴随着小规模海平面下降,促进了早期岩溶作用对礁滩体储层的改善(韩剑发等,2011;刘嘉庆等,2012;高达等,2013,2016;秦鹏等,2018;左洺涛等,2021)。早期岩溶作用主要形成以各组与原始沉积组构相关的孔隙,如粒内溶孔、铸模孔、生物体腔孔、粒间溶孔等;此外,还在一些沉积期古地貌较高部位形成非选择性的孔、洞、缝等反映早成岩近地表岩溶作用的孔隙(屈海洲等,2013)。塔中地区台缘带东部的礁滩体厚度更大,岩溶储层发育更好,这与较高的沉积古地貌和适宜的海平面变化条件是一致的(韩剑发等,2011;屈海洲等,2013)。

## 7 结 论

(1)TZ-X井良里塔格组中上部微相类型包括绿藻粒泥灰岩、砾状灰岩/礁灰岩、生屑粒泥灰岩、泥粒-颗粒灰岩等7种;良里塔格组沉积中-晚期,沉积环境由潮坪向生物礁-颗粒滩再到较深水的开阔台地演化。

(2)密集岩心取样的碳、氧同位素测试数据显示 $\delta^{13}\text{C}$ 值在0.5993‰~1.6228‰内变化,平均值为1.139‰, $\delta^{18}\text{O}$ 值变化区间为-8.3608‰~-5.1452‰,平均值为-6.790‰。 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的振荡变化与微相变化和高频层序对应良好。

(3)古海洋条件分析表明,良里塔格组沉积时期气候温热,生物和颗粒丰富的层段样品的古温度值最高,代表着高的碳酸盐产率。Z值指示底部潮坪沉积的水体盐度最高,在四级层序的顶部古盐度均明显减小,反映准同生期大气淡水的影响。塔北地区南缘和巴楚地区同期沉积物对比发现碳同位素的差异与台地环境和古水深密切联系。

(4)沉积期海平面变化控制着良里塔格组四级和五级层序的发育,海平面振荡主要受古气候变化驱动。海平面缓慢上升后持续稳定或小规模振荡,是连续厚层的生物碎屑和砂屑颗粒滩沉积发育的有利条件;海平面快速上升,沉积环境向滩间洼地和较深水的开阔台地转变。在高频层序顶部海平面的小规模下降导致的早期岩溶作用是礁滩体储层质量改善的重要因素。

## References

- Baud A, Magaritz M, Holser W T. 1989. Permian-Triassic of the Tethys: Carbon isotope studies[J]. *Geologische Rundschau*, 78(2): 649-677.
- Fang Dajun, Shen Zhongyue. 2001. Phanerozoic apparent polar-wander Paths of Tarim and plate motion[J]. *Journal of Zhejiang University*, 28(1): 100-106 (in Chinese with English abstract).
- Fu Kunrong, Huang Lili, Zhu Yi, Feng Xiangyilan, Zhang Qiao, Guan Xiaoli, Gao Da. 2018. The depositional diversity between platform margin and platform interior on the Late Ordovician carbonate rimmed-platform of Tazhong area: A case study of qualitative and quantitative integrated microfacies analysis[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 36(1): 101-109 (in Chinese with English abstract).
- Gao Da, Hu Mingyi, Li Anpeng, Yang Wei, Xie Wuren, Sun Chunyan. 2021. High-frequency sequence and microfacies and their impacts on favorable reservoir of the Longwangmiao Formation in the central Sichuan Basin[J]. *Earth Science*, 46(10): 3520-3534.
- Gao Da, Lin Changsong, Hu Mingyi, Huang Lili. 2016. Using spectral gamma ray log to recognize high-frequency sequences in carbonate strata: A case study from the Lianglitage Formation from Well T1 in Tazhong area, Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 34(4): 707-715 (in Chinese with English abstract).
- Gao Da, Lin Changsong, Yang Haijun, Zuo Xiangxiang, Cai Zhenzhong, Liu Jingyan, Zhang Lijuan, Li Hong. 2013. Microfacies of Late Ordovician Lianglitage Formation and their control on favorable reservoir in Tazhong area[J]. *Earth Science*, 38(4): 819-831 (in Chinese with English abstract).
- Gao Zhiyong, Zhang Shuichang, Zhu Rukai, Zhang Xingyang. 2007. Sea level change and source rock heterogeneity of Lianglitage Formation in Tazhong area [J]. *Acta Petroli Sinica*, 28(5): 45-50.
- Han Jianfa, Sun Chonghao, Yu Hongfeng, Ji Yungang, Zhang Zhenghong, Xu Yanlong. 2011. Kinetics of reef-shoal complexes and its restriction to reservoir in Ordovician from Tazhong I fault belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3): 845-856 (in Chinese with English abstract).
- Hao Yanzhen, pan Ming, Liang Bin, Zhang Qingyu, Dan Yong, Sun Chengjie. 2015. Sea-Level variation of Late Ordovician in eastern margin of Maigaiti Slope by strontium isotope ratio analysis[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 36(2): 159-163 (in Chinese with English abstract).
- He Bizhu, Jiao Cunli, Wang Shenglang, Deng Guozhen, Wang gonghuai, He Xipeng. 2009. Characteristics and exploration prospect of carbonate platform margin of Late Ordovician Lianglitage Formation in the Tazhong area, Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(7): 103-1046 (in Chinese with English abstract).
- Ji Zhansheng, Yao Jianxin, Wu Guichun, Sun Qian, Shi Qiuyuan, Li

- Hao, He Jifu, Zhang Shaowen. 2018. Land submerged to carbonate platform by conodonts: Paleoenvironment reconstruction of the western Gangdese in Tibet during Triassic[J]. *China Geology*, 1(3): 450–452.
- Jia Chengzao. 1999. Structural characteristics and oil/gas accumulative regularity in Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 20(3): 3–9, 94 (in Chinese with English abstract).
- Kaufman A J, Knoll A H. 1995. Neoproterozoic variations in the C–isotopic composition of seawater: Stratigraphic and biogeochemical implications[J]. *Precambrian Research*, 73(1): 27–49.
- Keith M L, Weber J N. 1964. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28(10): 1787–1816.
- Li Rufeng, Liu Benpei. 1996. Application of carbon and oxygen isotopes to carbonate sequence stratigraphy: Analysis of Maping Formation, southern Guizhou Province[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 21(3): 29–34 (in Chinese with English abstract).
- Li Yucheng. 1998. The Carbon isotope cyclostratigraphic responses to sea level change in Upper Permian limestones from south China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 16(3): 52–53, 55–57 (in Chinese with English abstract).
- Liang Wenjun, Xiao Chuantao, Xiao Kai, Lin wan. 2015. The relationship of Late Jurassic paleoenvironment and paleoclimate with geochemical elements in Amdo Country of northern Tibet[J]. *Geology in China*, 42(4): 1079–1091 (in Chinese with English abstract).
- Lin Changsong, Yang Haijun, Cai Zhenzhong, Yu Bingsong, Chen Jianqiang, Li Hao, Rui Zhifeng. 2013. Evolution of depositional architecture of the Ordovician carbonate platform in the Tarim Basin and its response to basin processes[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(5): 907–919 (in Chinese with English abstract).
- Lin Changsong, Yang Haijun, Liu Jingyan, Cai Zhenzhong, Peng Li, Yang Xiaofa, Yang Yongheng. 2009. Paleostuctural geomorphology of the Paleozoic central uplift belt and its constraint on the development of depositional facies in the Tarim Basin[J]. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 39(3): 306–316.
- Liu Cunge, Liu Yongli, Luo Mingxia, Shao Xiaoming, Luo Peng, Zhang Zhili. 2016. Fluctuation characteristics and correlation of carbon isotope in Ordovician, Tarim Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 43(2): 241–248 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jiaqing, Li Zhong, Han Yinxue, Peng Shoutao. 2010. Early diagenesis in high–frequency sequence framework of the Upper Ordovician carbonate platform in Tazhong, Tarim Basin and its influence on reservoir distribution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3629–3640 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jiaqing, Li Zhong, Huang juncuo, Han Yinxue, Peng Haijun. 2012. Distinct sedimentary environments and their influences on carbonate reservoir evolution of the Lianglitage Formation in the Tarim Basin, northwest China[J]. *Science in China: Earth Sciences*, 42(12): 1802–1816.
- Luo Beiwei, Wei Guoqi, Yang Wei, Dong Caiyuan. 2013. Reconstruction of the Late Sinian paleo–ocean environment in Sichuan Basin and its geological significance[J]. *Geology in China*, 40(4): 1099–1111 (in Chinese with English abstract).
- Luo Ping, Zhang Jing, Liu Wei, Song Jinmin, Zhou Gang, Sun Ping, Wang Daochuan. 2008. Characteristics of marine carbonate hydrocarbon reservoirs in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 15(1): 36–50 (in Chinese with English abstract).
- Ma Debo, Li Honghui, Cui Wenjuan, Li Tingting, Zhu Wenping. 2019. Segments of the platform margin of Lianglitage Formation, Upper Ordovician in Tabei Uplift, Tarim Basin, and its geological significance[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 54(1): 198–207, 12–13 (in Chinese with English abstract).
- Niu Jun, Huang Wenhui, Wang Xin. 2016. Carbonate petrological characteristics and sedimentary environment of the Upper Ordovician in Bachu area, Tarim Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 18(2): 207–219 (in Chinese with English abstract).
- Qin Peng, Hu Zhonggui, Wu Siyue, Zuo Mingtao, Han Lu. 2018. Vertical heterogeneity and formation mechanism of the platform edge reef and bank reservoir in Changxing Formation of eastern Sichuan Basin[J]. *Journal of Petrology and Mineralogy*, 37(1): 61–74.
- Qing H, Veizer J. 1994. Oxygen and carbon isotopic composition of Ordovician brachiopods: Implications for coeval seawater[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(20): 4429–4442.
- Qu Haizhou, Wang Zhenyu, Yang Haijun, Zhang Yunfeng, Yu Hongfeng, Wang Xi. 2013. Karstification of reef–bank facies carbonate rock and its control on pore distribution: A case study of Upper Ordovician Lianglitage Formation in eastern Tazhong area, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 40(5): 552–558 (in Chinese with English abstract).
- Qu Haizhou, Wang Zhenyu, Zhang Zhenghong, Zhang Yunfeng, Yu Hongfeng, Zheng Jian. 2014. Characteristics and evolution of sedimentary facies in the rimmed platform, Upper Ordovician, Tazhong area, Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(5): 823–831 (in Chinese with English abstract).
- Ren Dawei, Jiang Wei, Gao Da, Du Liu, Luo Xianfu. 2018. Control of sedimentary facies and high–frequency sequences on the reservoir of Longwangmiao Formation in Moxi area, Central Sichuan Basin[J]. *Geology and resources*, 27(1): 77–82.
- Rong Hui, Jiao Yangquan, Wu Liqun, Li Rong, Wang Rui, Lu Chao, Lu Lin. 2010. Oolitic shoal composition and its implication of Feixianguan Formation in Yudongzi section of Erlangmiao, Jiangyou, Sichuan, China[J]. *Journal of China University of*

- Geosciences, 35(1): 125–136.
- Shao Longyi. 1994. The radiation of the oxygen and carbon isotope in the carbonate rocks to the paleotemperature etc[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 23(1): 39–45 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chuanshang, Li Zhihong, Peng Zhongqin, Wang Baozhong, Zhang Guotao. 2014. The carbon isotope variation and its responses to sea level changes during the late Early Devonian period in Guizhou and Guangxi[J]. Geology in China, 41(6): 2039–2047 (in Chinese with English abstract).
- Yang Haijun, Liu Sheng, Li Yuping, Li Yong, Wu Guanghui, Wang Zhenyu, Chen Jingshan. 2000. Characteristics analysis of Middle–Upper Ordovician carbonate reservoir in Tazhong area[J]. Marine Origin Petroleum Geology, (Z1): 73–83 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jiangyong, Zhao Li, Li Bo, Li Xuejie, Zhong Hexian, Tian Chengjing. 2020. Carbonate cycle in sub-bottom strata in the South China Sea and the east sea area of Taiwan Island[J]. Geology in China, 47(5): 1486–1500(in Chinese with English abstract).
- Zhang Lijuan, Li Yong, Zhou Chenggang, Li Meng, Han Jie, Zhang Bo. 2007. Lithofacies Paleogeographical characteristics and reef–shoal distribution during the Ordovician in the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 28(6): 731–737 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiulian. 1985. Relationship between carbon and oxygen stable isotope in carbonate rocks and paleosalinity and paleotemperature of seawater[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 3(4): 17–30 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yixuan, Bai Chenyang, Liu Yujia, Yang Hailin, Livio Ruffine, Lai Yong, Lu Hailong. 2022. Sedimentary characteristics of the northern continental slope of the Danube Canyon in the northwest of the Black Sea and its relation with paleoclimate changes[J]. Geology in China, 49(3): 880–900(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuxi, Chen Jianwen, Zhou Jiangyu, Yuan Yong. 2019. Sedimentological sequence and depositional evolutionary model of Lower Triassic carbonate rocks in the South Yellow Sea Basin[J]. China Geology, 2(3): 301–314.
- Zhao Guowei. 2013. Late Ordovician Sea–Level Changes in Bachu Area, Xinjiang: Carbon, Oxygen and Strontium Isotopic Records[D]. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Zhou Jingao, Wang Xiaofang, Lu Junming. 2014. Types, characteristics, origin and exploration significance of reef–shoal reservoirs: A case study of Tarim Basin, NW China and Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 41(3): 257–267 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xueqin, Yang Haijun, Ma Qing, Zhou Chenggang, sun chonghao, Yin Tiejun, Cai Quan, Sun Shiyong. 2014. Sedimentary evolution and platform development models for the Ordovician carbonate rocks in northern Tarim Basin[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 34(2): 36–42 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zongju, Chen Xuan, Pan Mao, Wu Xingning, Zheng Xingping, Pan Wenqing. 2010. Milankovitch cycles in the Upper Ordovician Lianglitage Formation in the Tazhong–Bachu area, Tarim Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 84(4): 518–536 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zongju. 2015. Indicators of global sea–level change and research methods of marine tectonic sequences: Take Ordovician of Tarim Basin as an example[J]. Acta Petrolei Sinica, 36(3): 262–273 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yangdi, Cai Jinggong. 2013. Characteristics of carbon and oxygen isotopes of carbonate rocks in South Yellow Sea Basin and their implication[J]. Petroleum Geology and Experiment, 35(3): 307–313 (in Chinese with English abstract).
- Zuo Mingtao, Hu Zhonggui, Zhang Chunlin, Hu Mingyi, Yang Wei, Mo Wuling. 2021. Control of differential tectonic activities on carbonate reservoirs in craton basin: A case study of the subsalt reservoir of Majiagou Formation in Ordos Basin[J]. Geology in China, 48(3): 794–806(in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 方大钧, 沈忠悦. 2001. 塔里木地块各时代视磁极及板块漂移[J]. 浙江大学学报(理学版). 28(1): 100–106.
- 付坤荣, 黄理力, 祝怡, 冯翔艺蓝, 章巧, 关小丽, 高达. 2018. 塔中地区晚奥陶世碳酸盐台缘与台内沉积差异——定性和定量的碳酸盐岩微相综合分析[J]. 沉积学报, 36(1): 101–109.
- 高达, 胡明毅, 李安鹏, 杨威, 谢武仁, 孙春燕. 2021. 川中地区龙王庙组高频层序与沉积微相及其对有利储层的控制[J]. 地球科学, 46(10): 3520–3534.
- 高达, 林畅松, 杨海军, 左璠璠, 蔡振忠, 刘景彦, 张丽娟, 李虹. 2013. 塔中地区良里塔格组沉积微相及其对有利储层的控制[J]. 地球科学, 38(4): 819–831.
- 高达, 林畅松, 胡明毅, 黄理力. 2016. 利用自然伽马能谱测井识别碳酸盐岩高频层序——以塔里木盆地塔中地区 T1 井良里塔格组为例[J]. 沉积学报, 34(4): 707–715.
- 高志勇, 张水昌, 朱如凯, 张兴阳. 2007. 塔中地区良里塔格组海平面变化与烃源岩的非均质性[J]. 石油学报, 28(5): 45–50.
- 韩剑发, 孙崇浩, 于红枫, 吉云刚, 张正红, 徐彦龙. 2011. 塔中 I 号坡折带奥陶系礁滩复合体发育动力学及其控储机制[J]. 岩石学报, 27(3): 845–856.
- 郝彦珍, 潘明, 梁彬, 张庆玉, 淡永, 孙成杰. 2015. 依据铷同位素比值判断麦盖提斜坡东缘晚奥陶世海平面变化[J]. 新疆石油地质, 36(2): 159–163.
- 何碧竹, 焦存礼, 王生朗, 邓国振, 汪功怀, 何希鹏. 2009. 塔里木盆地塔中地区上奥陶统近环带状台地边缘相带特征及勘探前景[J]. 地质学报, 83(7): 1039–1046.
- 贾承造. 1999. 塔里木盆地构造特征与油气聚集规律[J]. 新疆石油地



- 质, 20(3): 3-9, 94.
- 李儒峰, 刘本培. 1996. 碳氧同位素演化与碳酸盐岩层序地层学关系研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 21(3): 29-34.
- 李玉成. 1998. 华南晚二叠世碳酸盐岩碳同位素旋回对海平面变化的响应[J]. 沉积学报, 16(3): 52-53, 55-57.
- 梁文君, 肖传桃, 肖凯, 林婉. 2015. 藏北安多晚侏罗世古环境、古气候与地球化学元素关系研究[J]. 中国地质, 42(4): 1079-1091.
- 林畅松, 杨海军, 蔡振中, 于炳松, 陈建强, 李浩, 芮志峰. 2013. 塔里木盆地奥陶纪碳酸盐岩台地的层序结构演化及其对盆地过程的响应[J]. 沉积学报, 31(5): 907-919.
- 林畅松, 杨海军, 刘景彦, 蔡振中, 彭莉, 阳孝法, 杨永恒. 2009. 塔里木盆地古生代中央隆起带古构造地貌及其对沉积相发育分布的制约[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 39(3): 306-316.
- 刘存革, 刘永立, 罗明霞, 邵小明, 罗鹏, 张智礼. 2016. 塔里木盆地奥陶纪碳同位素波动特征与对比[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 43(2): 241-248.
- 刘嘉庆, 李忠, 韩银学, 彭守涛. 2010. 塔里木盆地塔中上奥陶统碳酸盐台地高频层序控制的早期成岩作用及其对储层分布的影响[J]. 岩石学报, 26(12): 3629-3640.
- 刘嘉庆, 李忠, 黄君湊, 韩银学, 彭海军. 2012. 塔里木盆地良里塔格组沉积环境差异及其对碳酸盐储层发育的制约[J]. 中国科学: 地球科学, 42(12): 1802-1816.
- 罗贝维, 魏国齐, 杨威, 董才源. 2013. 四川盆地晚震旦世古海洋环境恢复及地质意义[J]. 中国地质, 40(4): 1099-1111.
- 罗平, 张静, 刘伟, 宋金民, 周刚, 孙萍, 王道申. 2008. 中国海相碳酸盐岩油气储层基本特征[J]. 地学前缘, 15(1): 36-50.
- 马德波, 李洪辉, 崔文娟, 李婷婷, 朱文平. 2019. 塔北地区上奥陶统良里塔格组台缘带分段性及石油地质意义[J]. 石油地球物理勘探, 54(1): 198-207, 12-13.
- 牛君, 黄文辉, 王鑫. 2016. 塔里木盆地巴楚地区上奥陶统碳酸盐岩岩石学特征及沉积环境[J]. 古地学报, 18(2): 207-219.
- 秦鹏, 胡忠贵, 吴嗣跃, 左沼滔, 韩露. 2018. 川东长兴组台缘礁滩相储层纵向非均质性特征及形成机制——以川东宣汉盘龙洞长兴组剖面为例[J]. 岩石矿物学杂志, 37(1): 61-74.
- 屈海洲, 王振宇, 杨海军, 张云峰, 于红枫, 王茜. 2013. 礁滩相碳酸盐岩岩溶作用及其对孔隙分布的控制——以塔中东部上奥陶统良里塔格组为例[J]. 石油勘探与开发, 40(5): 552-558.
- 屈海洲, 王振宇, 张正红, 张云峰, 于红枫, 郑剑. 2014. 塔中地区晚奥陶世镶边台地沉积演化[J]. 沉积学报, 32(5): 823-831.
- 任大伟, 江维, 高达, 杜柳, 罗贤富. 2018. 川中磨溪地区龙王庙组沉积相与高频层序对储层的控制[J]. 地质与资源, 27(1): 77-82.
- 荣辉, 焦养泉, 吴立群, 李荣, 王瑞, 鲁超, 吕琳. 2010. 江油二郎庙鱼洞子剖面飞仙关组鲕粒滩内部构成[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 35(1): 125-136.
- 邵龙义. 1994. 碳酸盐岩氧、碳同位素与古温度等的关系[J]. 中国矿业大学学报, 23(1): 39-45.
- 王传尚, 李志宏, 彭中勤, 王保忠, 张国涛. 2014. 黔桂地区早泥盆世晚期碳稳定同位素变化及其对海平面变化的响应[J]. 中国地质, 41(6): 2039-2047.
- 杨海军, 刘胜, 李宇平, 李勇, 邬光辉, 王振宇, 陈景山. 2000. 塔中地区中—上奥陶统碳酸盐岩储集层特征分析[J]. 海相油气地质, (Z1): 73-83.
- 张江勇, 赵利, 李波, 李学杰, 钟和贤, 田成静. 2020. 南海与台湾岛东部海域浅地层碳酸盐旋回[J]. 中国地质, 47(5): 1486-1500.
- 张丽娟, 李勇, 周成刚, 李猛, 韩杰, 张博. 2007. 塔里木盆地奥陶纪岩相古地理特征及礁滩分布[J]. 石油与天然气地质, 28(6): 731-737.
- 张秀莲. 1985. 碳酸盐岩中氧、碳稳定同位素与古盐度、古水温的关系[J]. 沉积学报, 3(4): 17-30.
- 张艺璇, 白辰阳, 刘宇佳, 杨海琳, Livio Ruffine, 赖勇, 卢海龙. 2022. 黑海西北部多瑙河峡谷北侧陆坡沉积特征及其与古气候的关系[J]. 中国地质, 49(3): 880-900.
- 赵国伟. 2013. 新疆巴楚地区中—晚奥陶世海平面变化: 碳、氧、锶同位素记录[D]. 长春: 吉林大学.
- 赵文智, 沈安江, 周进高, 王小芳, 陆俊明. 2014. 礁滩储集层类型、特征、成因及勘探意义——以塔里木和四川盆地为例[J]. 石油勘探与开发, 41(3): 257-267.
- 赵学钦, 杨海军, 马青, 周成刚, 孙崇浩, 尹铁君, 蔡泉, 孙仕勇. 2014. 塔北奥陶系碳酸盐岩沉积演化特征及台地发育模式[J]. 沉积与特提斯地质, 34(2): 36-42.
- 赵宗举, 陈轩, 潘懋, 吴兴宁, 郑兴平, 潘文庆. 2010. 塔里木盆地塔中—巴楚地区上奥陶统良里塔格组米兰科维奇旋回性沉积记录研究[J]. 地质学报, 84(4): 518-536.
- 赵宗举. 2015. 全球海平面变化指标及海相构造层序研究方法——以塔里木盆地奥陶系为例[J]. 石油学报, 36(3): 262-273.
- 郑仰帝, 蔡进功. 2013. 南黄海盆地碳酸盐岩碳氧同位素特征及意义[J]. 石油实验地质, 35(3): 307-313.
- 左沼滔, 胡忠贵, 张春林, 胡明毅, 杨威, 莫午零. 2021. 克拉通盆地差异性构造活动对碳酸盐岩储集体的控制——以鄂尔多斯盆地马家沟组盐下储层为例[J]. 中国地质, 48(3): 794-806.