

# 塔中东部地区上奥陶统良里塔格组同生期岩溶作用识别标志、发育特征及发育模式

张兴宇<sup>1</sup>, 屈海洲<sup>1\*</sup>, 张云峰<sup>1</sup>, 汤兴宇<sup>2</sup>, 王振宇<sup>1</sup>, 罗新生<sup>3</sup>, 雷银<sup>4</sup>, 张敏<sup>3</sup>, 裴钰<sup>5</sup>

<sup>1</sup>西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都

<sup>2</sup>中国石油西南油气田公司川西北气矿, 四川 江油

<sup>3</sup>中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院, 新疆 库尔勒

<sup>4</sup>中国石油西南油气田分公司工程技术研究院, 四川 成都

<sup>5</sup>川庆钻探工程有限公司, 四川 成都

收稿日期: 2022年2月16日; 录用日期: 2022年3月23日; 发布日期: 2022年3月30日

## 摘要

基于塔中东部地区良里塔格组沉积和构造背景, 利用岩心、薄片、测井、阴极发光、电子探针等手段和资料, 研究塔里木盆地塔中东部地区良里塔格组的同生期岩溶作用的识别标志、发育特征及发育模式。研究表明, 同生岩溶发育于良里塔格组沉积中晚期, 以具组构选择性的溶蚀孔隙(洞)、示顶底构造、悬垂形和新月形大气淡水胶结物等为基本特征。大气淡水成岩透镜体在垂向上可分为大气淡水渗流带、大气淡水潜流带、海水潜流带, 有效溶蚀孔隙多见于大气淡水渗流带及潜流带顶部, 其下胶结作用显著增强。研究区内井上普遍发育4~6大气淡水成岩透镜体, 具明显的纵向叠加特征, 单期次成岩透镜体厚度一般为10~40 m, 总厚度110~150 m。多期的礁滩体营建和海平面频繁升降控制了研究区同生岩溶的发育, 在研究区内呈透镜状平行于塔中 I 号构造带分布, 反映了台缘高能相带控制的岩溶作用模式。

## 关键词

岩溶作用, 良里塔格组, 同生岩溶, 塔中地区, 礁滩相

## Recognizable Indicators, Paleokarst Characteristics and Development Patterns of Upper Ordovician Lianglitage Formation in Eastern Tazhong Area, Tarim Basin, NW China

\*通讯作者。

文章引用: 张兴宇, 屈海洲, 张云峰, 汤兴宇, 王振宇, 罗新生, 雷银, 张敏, 裴钰. 塔中东部地区上奥陶统良里塔格组同生期岩溶作用识别标志、发育特征及发育模式[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(3): 356-365.

DOI: 10.12677/ag.2022.123037

Xingyu Zhang<sup>1</sup>, Haizhou Qu<sup>1\*</sup>, Yunfeng Zhang<sup>1</sup>, Xingyu Tang<sup>2</sup>, Zhenyu Wang<sup>1</sup>, Xinsheng Luo<sup>3</sup>, Yin Lei<sup>4</sup>, Min Zhang<sup>3</sup>, Yu Pei<sup>5</sup>

<sup>1</sup>School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>Northwest Sichuan Division, Southwest Oil & Gas Field Company, Petro China, Jiangyou Sichuan

<sup>3</sup>Research Institute of Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, Petro China, Korla Xinjiang

<sup>4</sup>Engineering Technology Research Institute, Southwest Oil and Gas Field Company, Petro China, Chengdu Sichuan

<sup>5</sup>Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., CNPC, Chengdu Sichuan

Received: Feb. 16<sup>th</sup>, 2022; accepted: Mar. 23<sup>rd</sup>, 2022; published: Mar. 30<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Based on the sedimentary and structural background of Lianglitage Formation in the east of central Tarim Basin, the identification marks, development characteristics and development model of syngenetic karstification of Lianglitage Formation in the Middle East of Tarim Basin are studied by means of core, thin section, logging, cathodoluminescence and electron probe. The study shows that syngenetic karst developed in the middle and late stage of Lianglitag formation sedimentation, and is basically characterized by fabric selective dissolution pores (caves), top and bottom structures, suspended and crescent atmospheric fresh water cements. The diagenetic lens of atmospheric fresh water can be vertically divided into atmospheric fresh water seepage zone, atmospheric fresh water subsurface flow zone and seawater subsurface flow zone. The effective dissolution pores are mostly found at the top of atmospheric fresh water seepage zone and subsurface flow zone, and the cementation under them is significantly enhanced. In the study area, 4~6 atmospheric fresh water diagenetic lenses are generally developed on the wells, with obvious vertical superposition characteristics. The thickness of single-stage diagenetic lenses is generally 10~40 m and the total thickness is 110~150 m. The multi-stage reef beach construction and frequent rise and fall of sea level control the development of syngenetic karst in the study area. It is lenticular and parallel to Tazhong I structural belt in the study area, reflecting the karstification mode controlled by the high-energy facies belt on the platform margin.

## Keywords

Karstification, Lianglitage Formation, Syngenetic Rock-Dissolution, Tazhong Area, Reef-Bank Facies

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

广义上的岩溶作用是指碳酸盐岩岩体在大气水环境及埋藏环境中, 受大气淡水、埋藏热液等各类流体的作用而产生的可溶性岩石的溶解、淋滤、侵蚀、搬运和沉积等一系列地质作用的总和[1] [2]。岩溶类型的划分方法繁多, 依据碳酸盐岩成岩阶段可将岩溶类型划分为同生岩溶、早成岩岩溶、中成岩岩溶、晚成岩岩溶, 分别对应成岩作用的同生成岩、早成岩、中成岩、晚成岩阶段[3]。同生岩溶主要是指发生

于沉积期, 碳酸盐沉积物短暂暴露于大气成岩环境中, 接受大气淡水渗入淋滤发生的岩溶。同生岩溶作用可以使碳酸盐岩沉积物发育选择性溶蚀孔隙。尤其是具有正性地貌特征的生物礁、滩等的中上部, 容易形成孔隙(洞)层, 是潜在的优质油气储层发育部位。

同生岩溶对塔里木盆地油气储层具有重要意义, 前人对此已经做了大量研究[4] [5] [6] [7], 并总结了其识别标志[8], 但前人研究大多集中于塔中北坡[9] [10]等地区, 专门针对塔中东部地区同生岩溶的研究相对较少。塔中东部地区上奥陶统良里塔格组中上部的良三段-良一段发育多期生物礁滩的复合体, 具备岩溶作用的基本条件, 因此该区域的同生岩溶的发育特征及模式等, 需要更为深入的系统研究。

本次研究在前人工作的基础上, 基于井下岩心、岩心薄片、阴极发光、常规测井、成像测井等资料, 通过对塔中东部地区良里塔格组同生期岩溶作用识别标志的辨识、同生岩溶作用分布特征的刻画, 构建研究区良里塔格组同生岩溶作用发育模式。

## 2. 区域地质概况

塔中地区奥陶系上统良里塔格组是塔里木盆地重要的油气勘探层位, 以石灰岩为主, 并发育多种岩溶类型[11] [12] [13] [14] [15], 本次研究区位于塔里木盆地塔中东部地区(图 1), 呈北西向条带状展布, 南北两侧以断裂带形式分别与塘古孜巴斯凹陷和满加尔凹陷相邻, 东侧通过塔中 I 号断裂带与塔东低凸起相接[16]。塔中地区经历了加里东期、海西期、印支期等多期次构造运动的叠加改造, 最终形成了塔中地区低凸起和其上的左行雁列式背斜、逆断层带的构造格局[17]。

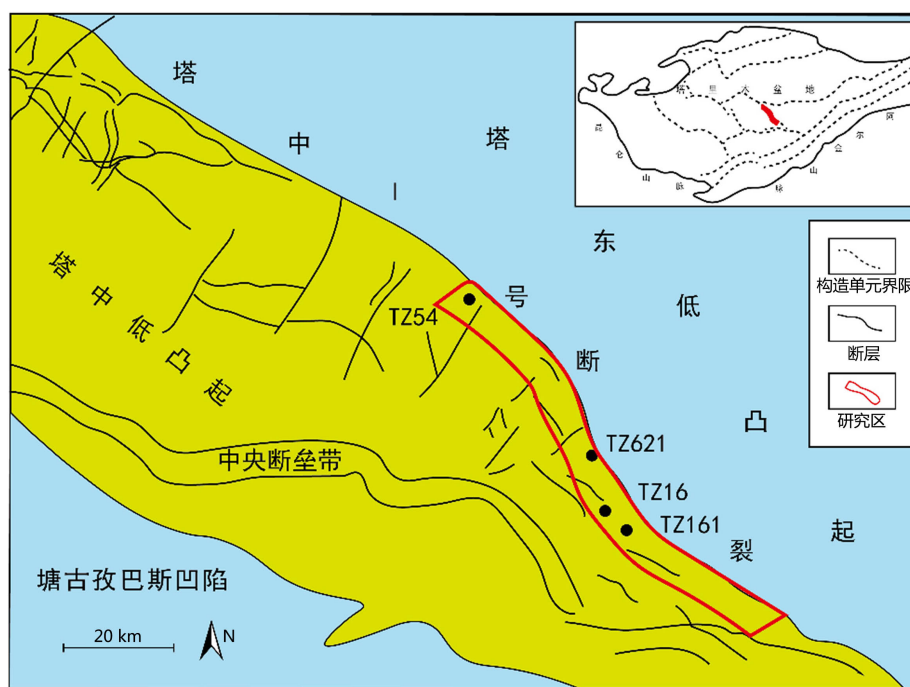


Figure 1. Location map of the study area

图 1. 研究区构造位置图

晚奥陶世良里塔格组沉积时期, 塔中地区水体深度较浅且温暖清洁、古盐度正常, 沿塔中 I 号构造带发育的礁滩复合体[18] [19] [20], 为古岩溶的形成提供了良好的物质基础和地貌条件。研究区内沉积相可细分为生物礁、颗粒滩、滩间海、台内洼 4 类沉积亚相亚相[21], 并在呈现纵向叠置迁移, 横向分带及平面环带状分布的特点[14]。

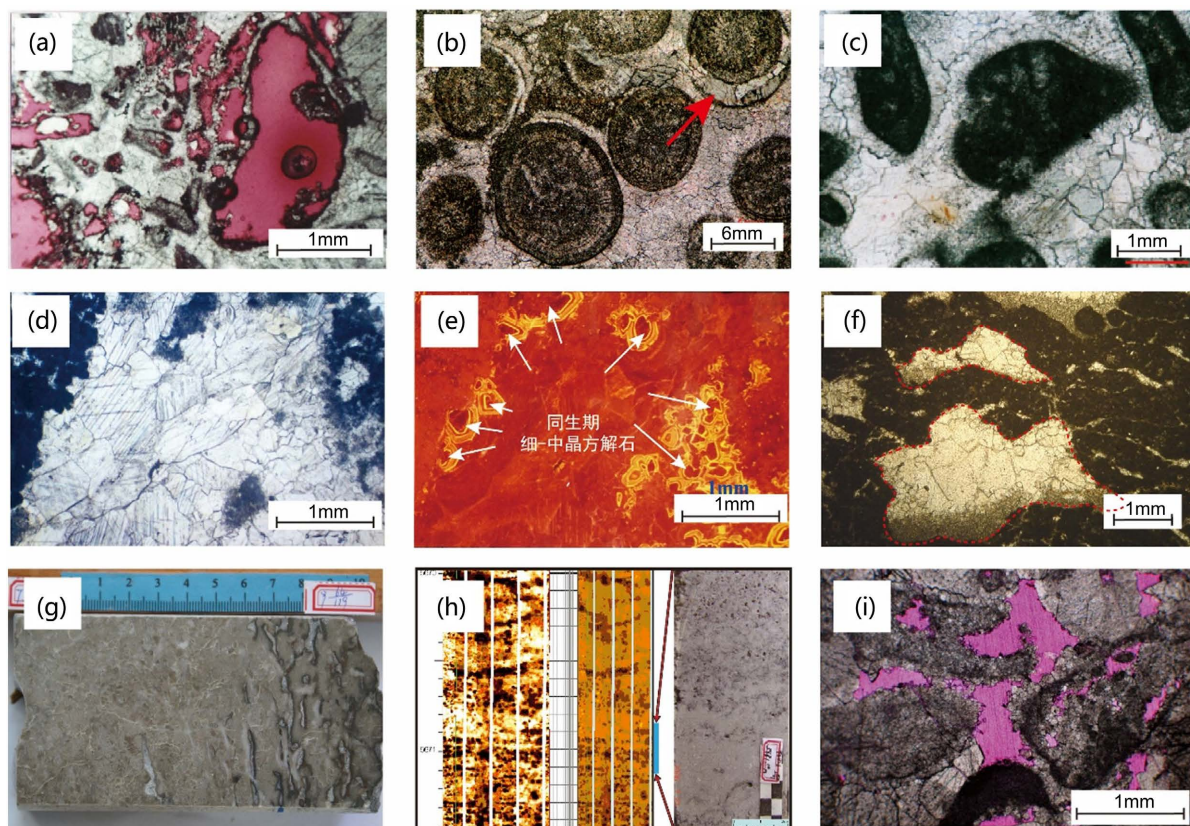
### 3. 同生岩溶作用识别标志及特征

#### 3.1. 识别标志

同生岩溶发生于良里塔格组中上部生物礁、颗粒滩的沉积期。伴随海平面暂时性下降，良里塔格组礁滩复合体在海退沉积序列中，短暂地暴露出海面，在大气淡水环境中发生溶蚀、胶结作用并产出各类同生岩溶判别标志。塔中东部地区良里塔格组同生岩溶标志包括：

##### 1) 选择性溶蚀孔洞特征

研究区良里塔格组多见粒内孔和铸模孔，是礁滩沉积后的海平面下降时期，由文石和高镁方解石构成的藻砂屑、鲕粒、生物碎屑在大气淡水环境中遭受选择性溶蚀而形成(图 2(a))。随着多期次溶蚀胶结作用的叠加影响，先期形成的选择性溶蚀孔洞可能会在后期被充填。



(a) 选择性溶蚀孔洞，TZ54 井，良里塔格组；(b) 藻砂屑底部见悬垂状方解石胶结物，形成于大气渗流环境，亮晶棘屑藻砂屑灰岩，TZ161 井，4620，良里塔格组，单偏光；(c) 颗粒间为亮晶方解石两期充填，第一期为纤维状胶结物围绕颗粒表面，第二期为粗晶方解石，两期胶结物不整合接触，砾屑灰岩，TZ15 井，4672.48 m，良里塔格组，单偏光；(d) 溶蚀孔洞中充填中-粗晶方解石。泥晶藻灰岩，塔中 161 井，4442.2 m，良里塔格组，单偏光。(e) 图(d)的同视域阴极发光照片，洞壁见同生期细-中晶方解石，发暗橙-橙黄光，呈环带状，中央粗-极粗晶方解石发暗橙光，泥晶藻灰岩。TZ161 井，4442.2 m，上奥陶统良里塔格组；(f) 溶蚀孔洞具示顶底构造，上部为粗结构的亮晶方解石充填，下部充填渗流粉砂，凝块石灰岩，TZ16 井，4265.7 m，良里塔格组，单偏光；(g) 示顶底构造在宏观上的表现，似层状溶孔底部充填渗流粉砂，顶部充填亮晶胶结物；(h) 均匀分布的溶蚀孔洞未充填，在成像测井图像中表现为均匀分布的暗斑，三张小图自左向右分别为成像测井的动态图像、静态图像、标记的对应深度范围的岩心照片。TZ826 井，5670~5671.4 m，良里塔格组；(i) 粒间孔和粒间溶孔发育，TZ826 井，5670.9 m，良里塔格组，图(h)所示深度范围内红色铸体薄片。

Figure 2. Identification marks of contemporaneous karst

图 2. 同生期岩溶识别标志

## 2) 胶结物形态及其地化特征

碳酸盐岩胶结物的形态[22] [23] [24]、微量元素[24] [25] [26] [27]和阴极发光性[28] [29] [30]与成岩环境具有良好的相关性。大气淡水胶结物是大气淡水环境的标志,也是岩石遭受大气淡水溶蚀的重要证据。

研究区良里塔格组可见两种类型的大气淡水胶结物:在大气淡水渗流带主要由由细粒状方解石组成的新月型或悬垂状胶结物(图 2(b))。大气水潜流带中形成以等轴细粒状、等厚的叶片状、刃状或犬牙状、菱形、六面体粉-细晶方解石为代表的第二期胶结物。它们可以沿充填原生孔隙的纤状环边胶结物的外缘生长。若第一期海底胶结物形成后遭受溶蚀,则第一期胶结物和第二期胶结物呈不整合接触,也可作为“第一期”胶结物充填于早期大气淡水溶蚀形成的次生孔隙中(图 2(c))。

通过对 9 个颗粒灰岩和礁灰岩溶孔中的粗叶片状方解石、犬牙状方解石和细粒等轴状方解石的电子探针微量元素分析表明(表 1),大气淡水胶结物总体上显示出低的 Mg、Sr 和 Na 值,以及低的 Fe、Mn 值,反映了来自大气淡水的稀释作用特征。不含 Fe、Mn 或低的 Fe、Mn 含量,指示了近地表的氧化和弱氧化环境。经同生期胶结物微量元素分析可知,胶结物中 Mn、K 等发光元素含量普遍较低,因此同生期方解石胶结物普遍不发光或发昏暗-暗橙光。见于 TZ161 井 4442.2 m 处的泥晶藻灰岩,溶洞环壁生长细-中晶方解石,为大气淡水环境胶结物,发暗橙-橙色光(图 2(e), 图 2(f)),细-中晶方解石外围呈环带状发光特征,表明其成岩环境发生多次变化。

**Table 1.** EPMA analysis results of atmospheric fresh water cement

**表 1.** 大气淡水胶结物的电子探针分析结果

井号	深度(m)	孔隙及胶结物	发光特征	微量元素(ppm)						
				MgO	SrO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	BaO	MnO	FeO
TZ161	4360.0	超大溶孔, 粒状	昏暗光	1320	200	0	160	590	520	0
TZ161	4442.2	超大溶孔, 粒状	暗橙光	1480	820	10	0	570	0	0
TZ24	4519.4	超大溶孔, 刃状	暗橙光	1510	520	1280	0	0	0	0
TZ24	4690.8	砾间溶孔, 刃状	昏暗光	1170	0	0	0	0	0	0
TZ24	4690.8	砾间溶孔, 叶片状	昏暗光	1720	0	770	60	0	0	280
TZ26	4281.6	超大溶孔, 叶片状	不发光	680	470	0	0	0	0	10
TZ30	5065.7	超大溶孔, 刃状	昏暗光	1000	1090	0	0	1270	0	0
TZ44	5017.1	窗格孔, 细粒状, 二期	不发光	770	0	10	0	0	660	0
TZ45	6112.7	粒间孔, 叶片状	不发光	560	450	610	0	0	0	220

## 3) 渗流粉砂

渗流粉砂主要为粉砂-泥级碎屑沉积物充填于铸模孔、粒内溶孔或溶缝内,可与后续生成的亮晶胶结物形成示顶底构造。该现象在微观和宏观层面均有体现(图 2(g)),可作为同生期暴露和溶蚀的标志。

## 4) 测井标志

同生期岩溶会发育大量溶蚀孔洞,反应在成像测井图像上为均匀分布的斑点。对比岩心和成像测井图像可知,若孔洞未被充填,在测井图像上表现为均匀分布的暗斑斑(图 2(h)),否则为暗斑。

## 3.2. 分布特征

### 1) 大气淡水成岩透镜体内的垂向分带特征

同生期大气淡水成岩透镜体内溶蚀胶结作用在纵垂上具分带特征,自上向下可分为大气淡水渗流带、大气淡水潜流带、海水潜流带。其中,大气淡水渗流带及大气淡水潜流带顶部的溶蚀作用占主导地位,大气淡水潜流带中部及以下位置胶结作用明显,并随深度增加而增强[31][32]。

以塔中 161 井内良二段 4290~4360 m 垂向剖面为例(图 3),4290~4303 m 为大气淡水渗流带范围,在大气淡水渗流环境中,随深度增加,溶蚀作用减弱,胶结作用增强,孔隙度逐渐降低。当礁滩体暴露在大气渗流环境中,礁滩体受到对  $\text{CaCO}_3$  不饱和的大气淡水的渗滤作用,沉积物中多发生组构选择性溶蚀,形成粒内溶孔、铸模孔、粒间溶孔。当更长时间内处于大气淡水成岩环境中,可发生非组构选择性溶蚀,形成小型溶蚀孔洞、溶沟,其内可被渗流粉砂、泥质充填。随着深度的增加和流体中  $\text{CaCO}_3$  逐渐饱和,在表面张力和重力作用下,碳酸盐岩颗粒之间形成新月形、悬垂型胶结物;4303~4335 m 为大气淡水潜流带范围,表现为活跃的饱和带,表现为广泛分布的粒内孔和铸膜孔,胶结作用增强,孔隙度明显降低;塔中 161 井 4335~4360 m 表现为大气成岩透镜体的海底潜流带,表现为以胶结作用为主,叶片状、刃状、纤维状胶结物发育,仅见少量粒间孔,整体来说,海底胶结物常见,溶蚀作用微弱,原生孔隙被大量充填,孔隙度大幅度降低。

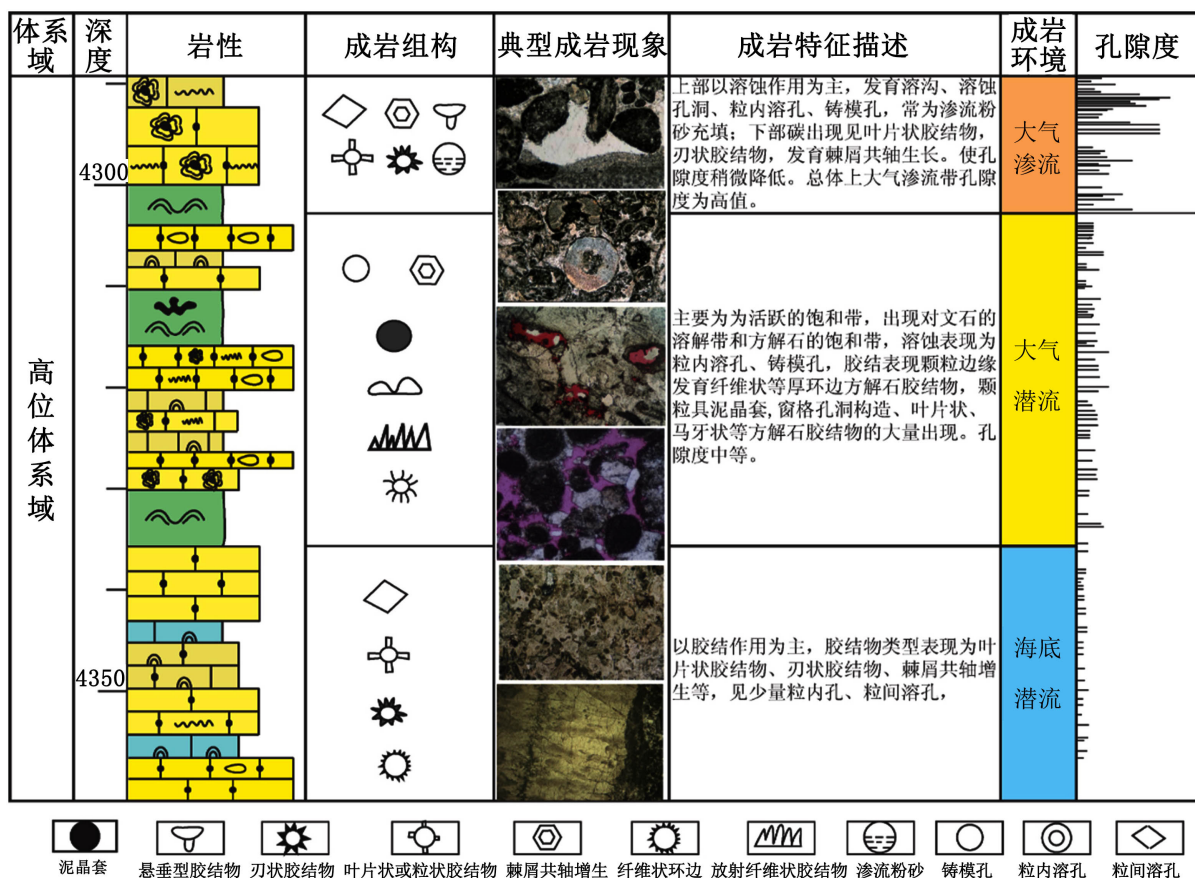


Figure 3. Vertical zoning section of Well TZ161

图 3. TZ161 井良二段 4290~4360 m 同生岩溶垂向分带剖面

## 2) 大气淡水成岩透镜体的空间分布特征

垂向上,研究区良里塔格组礁滩复合体早成岩大气淡水溶蚀作用具有明显的旋回性,受沉积体和海平面变化影响明显。以塔中 161 井为例,大气淡水溶蚀作用产生的孔隙类型主要为粒内溶孔、铸模孔、

粒间溶孔。孔隙发育段分布于 4257.5~4360 m, 4372.5~4389.5 m, 4397~4426 m, 4441.5~4455 m, 4470.5~4489 m, 4541.5~4558 m。顶部发育大套的孔隙发育段, 与表生成岩阶段的喀斯特溶蚀改造作用有关。就早成岩大气淡水溶蚀作用而言, 单个孔隙发育段在几米到几十米之间, 下部孔隙发育段基本上在 10~30 m 之间, 受早成岩大气淡水溶蚀作用控制作用比较明显, 后期改造较弱。每个大气淡水成岩透镜体可分为垂直渗流带和水平潜流带, 垂直渗流带。岩心及镜下观察发现, 在大气淡水渗流带内, 颗粒之间可见的新月形、悬垂型胶结物和示顶底构造。大气潜流成岩环境中, 可见叶片状方解石胶结物、棘屑共轴生长。根据不同环境的识别标志, 对塔中 161 井早成岩大气淡水溶蚀作用进行垂向分带, 共可以识别出四期半早成岩大气淡水溶蚀作用发育段, 单个旋回厚度在 11~41.5 米之间。

横向上, 研究区内发育同生期大气淡水溶蚀范围较广, 但仍受沉积相范围控制[33] [34] [35]。以平行于塔中 I 号坡折带 TZ82-TZ62\_3-TZ44-TZ62-TZ24 井剖面为例(图 4), 沉积间期大气淡水溶蚀作用主要发生于良三 - 良一段, 纵向上发育 4~6 个大气成岩透镜体, 反映出研究区普遍发育多期次大气淡水溶蚀作用。自 TZ82 井至 TZ24 井方向, 不同井间发育大气淡水成岩透镜体的层位、单期次厚度、总厚度差异明显。TZ82 井沉积间期大气淡水溶蚀只发育于良一 - 良二段, 其他井在良一 - 良三段均有发育。由 TZ82-TZ24 井方向期次增多, 单期次厚度和总厚度呈增大趋势。如塔中 62-3 井单期次厚度最大为 37 m, 总厚度为 110 m, 至塔中 24 井单期次最大厚度为 52 m, 总厚度为 150 m, 表明向塔中 24 井方向大气淡水溶蚀时间呈增大趋势。向塔中 24 井方向大气淡水成岩透镜体连续性好, 表明区域内礁滩体的暴露具有时间上一致性。

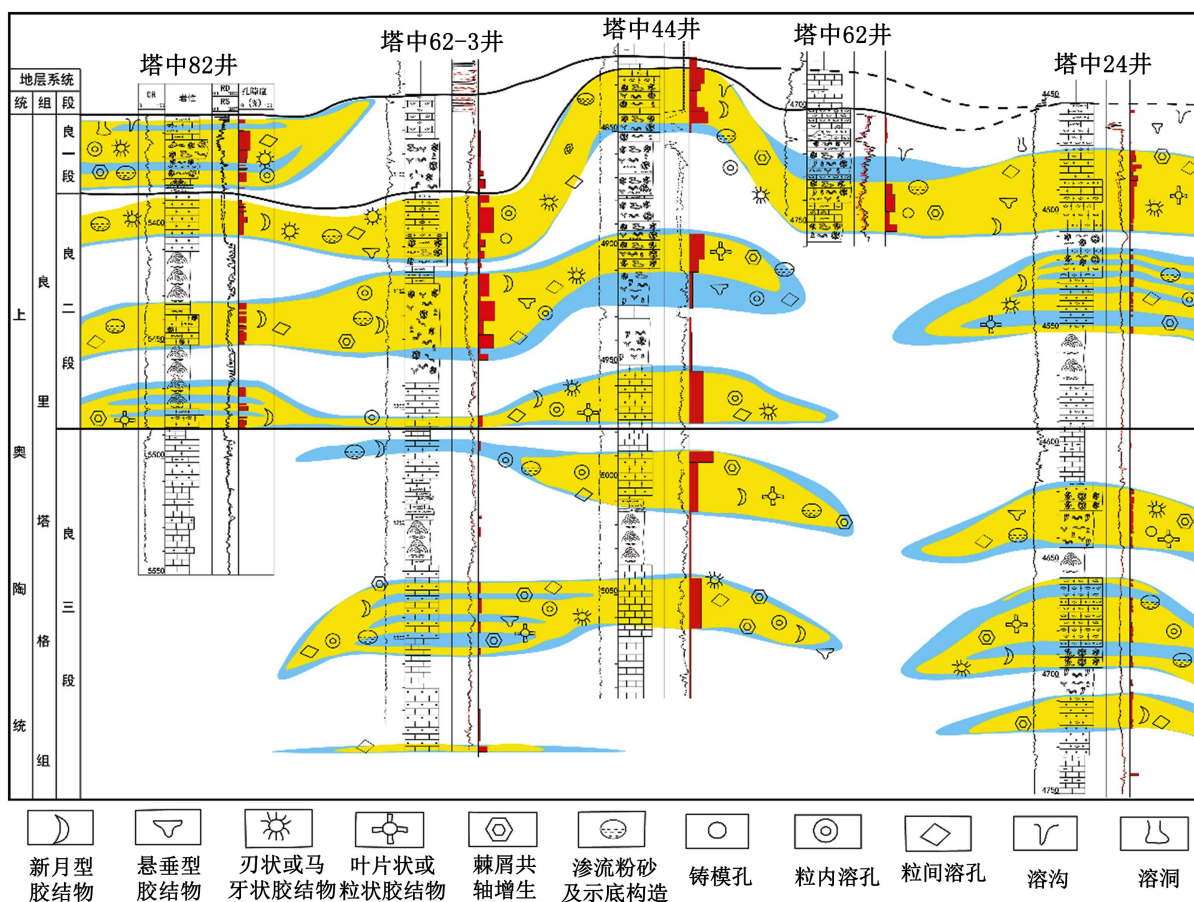


Figure 4. Transverse section of TZ82-TZ62\_3-TZ44-TZ62-TZ24

图 4. TZ82-TZ62\_3-TZ44-TZ62-TZ24 横向剖面

#### 4. 同生岩溶作用发育模式

通过对同生期气候环境特征、先期沉积物特征、相对海平面变化、礁滩体微地貌、古水文及成岩环境、溶蚀胶结的垂向分带以及早成岩大气淡水溶蚀作用发育与海平面变化及礁型微 + 地貌关系分析, 建立塔中地区上奥陶统良里塔格组礁滩体早成岩大气淡水溶蚀作用的发育模式。

礁型地貌隆起和海平面相对变化所控制的暴露, 是研究区良里塔格组同生期大气淡水溶蚀的根本原因。良里塔格组沉积早期, 造礁生物沿塔中 I 号断裂带方向分布, 即发育台缘礁滩相, 进而分异出滩翼、滩核、滩间和礁翼、礁核、礁间(图 5(a)), 随着相对海平面的下降, 礁滩体高部位出露海面, 在大气淡水环境中接受大气淡水溶蚀, 形成大气成岩透镜体, 并在垂向上分异出大气淡水渗流带、大气淡水潜流带、海底潜流带, 形成具选择性溶蚀孔洞、具同生期形态特征及接触特征的胶结物、示顶底构造、新月状和悬垂状胶结物等一系列具同生期大气淡水溶蚀特征的产物。

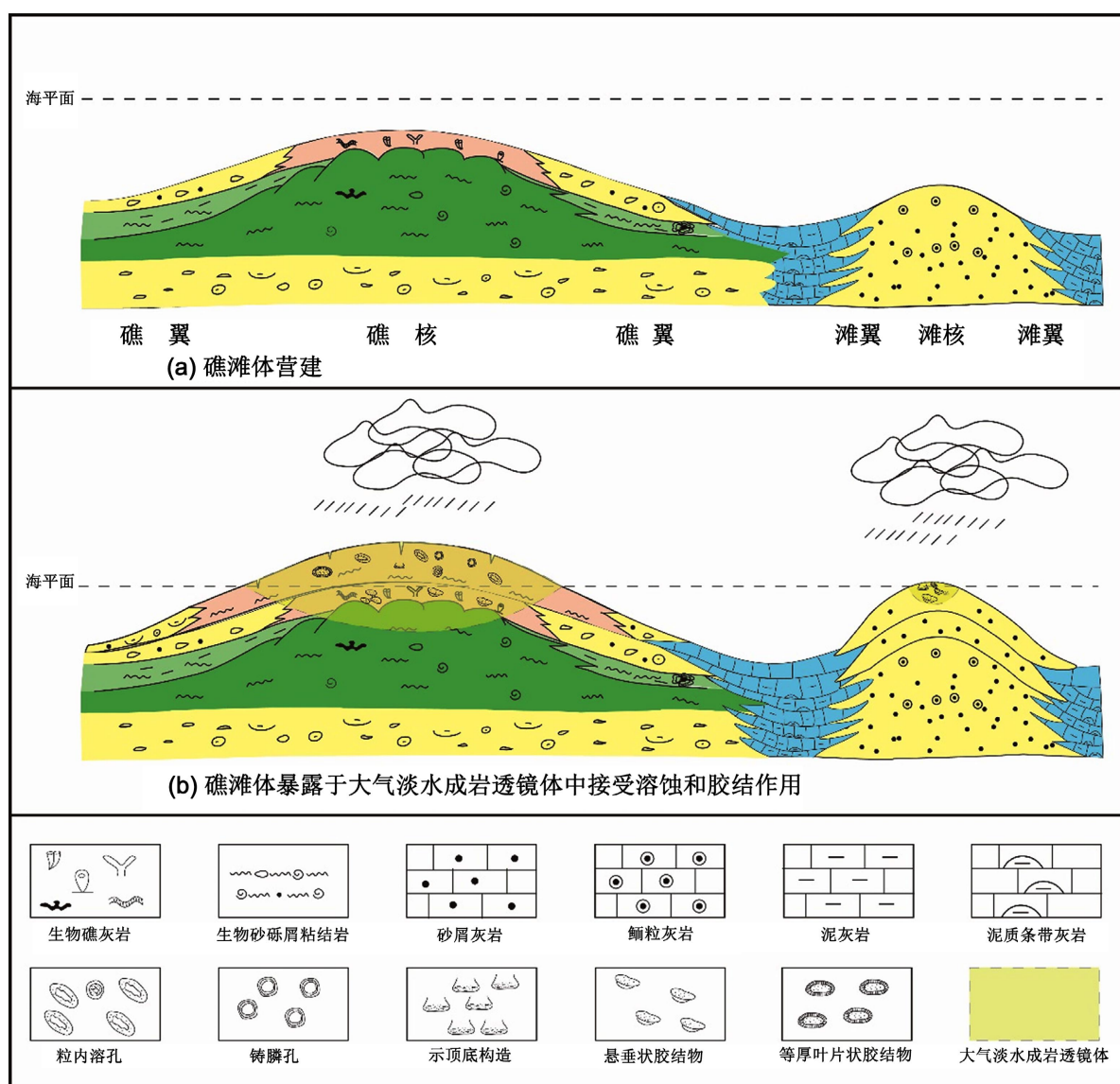


Figure 5. Pattern diagram of syngenetic rock-dissolution  
图 5. 塔中东部地区良里塔格组同生岩溶发育模式



频繁的海平面升降及多期的礁滩体营建控制了多期次早成岩阶段大气淡水透镜体的发育。同一个暴露阶段可能是由多个次一级的海平面变化和暴露组成,随着次一级的潜水面的升降、迁移,同一位置处的沉积物可能受到了多次渗流、潜流作用带的叠加、复合(图 5(b))。多次的早成岩大气淡水溶蚀作用的改造,使得其储集性能得到进一步的提升。因此,早成岩大气淡水溶蚀作用是塔中地区上奥陶统良里塔格组优质储层形成的重要原因。

## 5. 结论

1) 研究区良里塔格组顶部发育同生期大气淡水溶蚀,以组构选择性溶蚀孔隙(洞)、示顶底构造、新月状大气淡水胶结物、悬垂状大气淡水胶结物为典型标志。

2) 同生期大气淡水溶蚀形成的大气淡水成岩透镜体垂向上可划分为大气淡水渗流带、大气淡水潜流带、海水潜流带。有效溶蚀孔洞主要发育于大气淡水渗流带和大气淡水潜流带顶部,单层有效孔隙度段厚度一般为 10~30 m,是储层发育的有利区域。潜流带中部及以下位置受胶结作用影响,孔隙度大幅降低,多为非储层发育区。

3) 研究区内良里塔格组纵向上普遍发育 4~6 个大气成岩透镜体,单期次厚度一般为 10~50 m,总厚度 110~150 m,且由 TZ82 向 TZ24 井方向呈现发育期次增多、单期次厚度、总厚度呈增大趋势。

4) 礁型地貌隆起和海平面相对变化所控制的暴露,是研究区良里塔格组同生期大气淡水溶蚀的根本原因。平行于塔中 I 号坡折带方向的礁滩体高地貌位置是早成岩期大气淡水溶蚀的有利区域。

## 参考文献

- [1] 袁道先. 中国岩溶学[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 1-2.
- [2] Moore, C.H. (2001) Porosity Evolution and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework. Elsevier Science, Amsterdam, 194-200.
- [3] 中石油天然气股份有限公司杭州地质研究院. SY/T5478-2019 碳酸盐岩成岩阶段划分[S]. 北京: 国家能源局, 2019.
- [4] 赵文智, 沈安江, 潘文庆, 等. 碳酸盐岩岩溶储层类型研究及对勘探的指导意义——以塔里木盆地岩溶储层为例[J]. 岩石学报, 2013, 29(9): 3213-3222.
- [5] 万欢. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩古岩溶形成机理与分布预测[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2012.
- [6] 张庆玉. 塔里木盆地哈拉哈塘地区奥陶系碳酸盐岩古岩溶发育机理[D]: [博士学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 2018.
- [7] 肖笛. 海相碳酸盐岩早成岩期岩溶及其储层特征研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- [8] 王振宇, 李凌, 谭秀成, 等. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩古岩溶类型识别[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008(5): 11-16.
- [9] 陈红汉, 吴悠, 朱红涛, 等. 塔中地区北坡中-下奥陶统早成岩岩溶作用及储层形成模式[J]. 石油学报, 2016, 37(10): 1231-1246.
- [10] 杨磊磊, 陈冬华, 于林姣, 等. 成岩早期大气淡水淋滤作用对碳酸盐岩储集层的影响——以塔里木盆地顺南地区为例[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2020, 39(4): 843-852.
- [11] 陈景山, 李忠, 王振宇, 等. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩古岩溶作用与储层分布[J]. 沉积学报, 2007(6): 858-868.
- [12] 张恒, 蔡忠贤, 漆立新, 等. 塔中隆起中-下奥陶统岩溶水文地貌条件及控储机制[J]. 石油学报, 2018, 39(9): 990-1005.
- [13] 陈红汉, 吴悠, 朱红涛, 等. 塔中地区北坡中-下奥陶统早成岩岩溶作用及储层形成模式[J]. 石油学报, 2016, 37(10): 1231-1246.
- [14] 熊良. 塔中西部奥陶系鹰山组古岩溶特征及主控因素[J]. 新疆地质, 2019, 37(2): 219-225.
- [15] 伊硕, 黄文辉, 万欢. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩古岩溶差异分析[J]. 东北石油大学学报, 2018, 42(1): 1-13, 121.
- [16] 王步清, 黄智斌, 马培领, 等. 塔里木盆地构造单元划分标准、依据和原则的建立[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(1): 86-93.

- [17] 雷克辉, 钟宁宁, 王冰洁, 周洪义. 塔中 I 号断裂系统空间展布及演化规律[J]. 特种油气藏, 2013, 20(2): 12-15.
- [18] 屈海洲, 王振宇, 张正红, 等. 塔中地区晚奥陶世镶边地沉积演化[J]. 沉积学报, 2014, 32(5): 823-831.
- [19] 赵宗举. 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, 2015, 36(3): 262-273.
- [20] 王振宇, 孙崇浩, 杨海军, 等. 塔中 I 号坡折带上奥陶统台缘礁滩复合体建造模式[J]. 地质学报, 2010, 84(4): 546-552.
- [21] 刘忠宝, 沈杰, 杨圣彬, 等. 塔里木盆地塔中地区上奥陶统台缘带沉积特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(8): 3025-3031.
- [22] 王振宇, 吴丽, 张云峰, 等. 塔中上奥陶统方解石胶结物类型及其形成环境[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(3): 265-271.
- [23] 程鑫, 操应长, 远光辉, 等. 东营凹陷草桥潜山岩溶储层胶结物特征及其储层成因[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(1): 1-11.
- [24] 胡华蕊, 严张磊, 邢凤存. 塔中地区中 2 井良里塔格组溶洞方解石胶结序列及环境指示[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2018, 45(6): 679-690.
- [25] 杨翰轩, 胡安平, 郑剑锋, 等. 面扫描和定年技术在古老碳酸盐岩储集层研究中的应用——以塔里木盆地西北部震旦系奇格布拉克组为例[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 935-946.
- [26] 李映涛, 张哨楠, 韩俊, 等. 塔中北坡中-下奥陶统碳酸盐岩缝洞方解石充填物地球化学特征差异及其对储层的指示意义[J]. 地质科技情报, 2018, 37(1): 37-45.
- [27] 刘超, 马骄, 萨如力草克提·沙拉克, 等. 沙垒田地区奥陶系古岩溶储层热液流体改造的地球化学证据[J]. 断块油气田, 2021, 28(5): 620-624.
- [28] 黄思静, 卿海若, 胡作维, 等. 川东三叠系飞仙关组碳酸盐岩的阴极发光特征与成岩作用[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2008(1): 26-34.
- [29] 李北康. 川中地区下寒武统龙王庙组白云岩阴极发光特征与成岩作用[D]: [硕士学位论文]. 成都, 成都理工大学, 2016.
- [30] 黄思静. 碳酸盐岩的成岩作用[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- [31] 闫伟. 冀中坳陷下古生界岩溶类型及岩溶模式研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2019.
- [32] 肖笛. 海相碳酸盐岩早成岩期岩溶及其储层特征研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- [33] 赵一入. 塔中地区上奥陶统良里塔格组台缘台内储层差异及成因分析[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2018.
- [34] 杨孝群. 塔里木盆地塔北地区奥陶系碳酸盐岩高精度层序格架及内幕岩溶储层发育机制[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- [35] 屈海洲, 王振宇, 杨海军, 等. 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, 2013, 40(5): 552-558.