

塔里木盆地寒武系白云岩构造裂缝发育特征

张鹏^{1,2}, 侯贵廷^{1,2}, 潘文庆³, 齐英敏³, 张庆莲^{1,2}, 孟庆峰^{1,2}

(1 造山带与地壳演化教育部重点实验室; 2 北京大学地球与空间科学学院)

(3 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院)

摘要 采用加权有效裂缝面密度参数,可以反映研究层段有效裂缝的整体发育情况。基于塔里木盆地牙哈、英买力、塔中和塔东等四个地区28口井的岩心观察,对寒武系上、中、下统的白云岩构造裂缝分别进行了统计分析。结果表明:构造裂缝发育程度方面,内幕型裂缝发育区(塔中地区和塔东地区)加权裂缝平均面密度明显大于潜山型裂缝发育区(牙哈地区和英买力地区);有效裂缝发育程度方面,塔中地区和牙哈地区上寒武统加权有效裂缝平均面密度较大,反映了裂缝对白云岩储层有较好的改造作用;英买力地区中寒武统有效裂缝相对发育;塔东地区各统有效裂缝基本不发育。有效裂缝发育程度的差异,与潜山区和内幕区构造活动强度、流体活动类型及裂缝充填的差异有关。

关键词 塔里木盆地; 寒武系; 白云岩; 构造裂缝; 裂缝特征; 有效裂缝; 裂缝密度

中图分类号: TE122.2³

文献标识码: A

白云岩是一类重要的碳酸盐岩储层^[1-2]。随着深度增加,白云岩储层所占比例呈逐渐增大的趋势^[3]。裂缝的发育,对白云岩内部已有的孔洞起到一定的连通作用。按成因机制,裂缝可分为构造裂缝和非构造裂缝。构造裂缝主要是指构造应力作用下岩石破裂而形成的裂缝,一般成组出现、走向稳定,能指示主应力方向^[4-5]。相对于非构造成因缝而言,构造裂缝分布更具有区域性规律。开展构造裂缝特征研究,对储层特征研究有重要意义,本文讨论的裂缝均为构造裂缝。

目前,对塔里木盆地地下古生界潜山型裂缝发育区(如牙哈地区)研究相对充分,认为裂缝对储层改造作用明显,并有部分油气显示井^[6-7],而对内幕型裂缝发育区(如塔中地区)的有效裂缝发育情况缺乏了解,研究尚处于初步阶段。本文基于寒武系岩心裂缝观察与裂缝面密度统计,结合区域构造地质,对盆地内牙哈、英买力、塔中和塔东等四个地区寒武系裂缝发育的时空特点与差异机制进行探讨。

1 地质背景

塔里木盆地为造山带所围限,北缘和西缘为天山造山带,南缘为西昆仑造山带和阿尔金造山带^[8-10]。塔里木盆地震旦纪为一个较稳定的克拉通,后经历了加里东期、海西期、印支期和喜马拉雅期等多期构造活动^[10]。受构造活动差异性控制,盆地内塔中、塔东和巴楚地区沉积了震旦系—新近系相对完整的地层,下古生界属于内幕区;牙哈、英买力地区,受加里东晚期至海西早期构造活动的影响而抬升剥蚀,缺失奥陶系—侏罗系,下古生界属于潜山区,上寒武统的顶界面发育一套风化壳,受风化、淋滤影响较大^[11-12]。根据下古生界地层结构特点,本文把寒武系构造裂缝发育区划分为两类,即潜山型裂缝发育区和内幕型裂缝发育区。

塔里木盆地深部白云岩主要发育于震旦系—寒武系,本次主要基于四个地区28口钻井(图1,牙哈地区7口井,英买力地区9口井,塔中地区7口井,塔东地区5口井;牙哈和英买力地区钻井较多,仅标示了部

收稿日期: 2013-04-01; 改回日期: 2013-12-06

本文受国家重大专项“海外重点裂谷盆地油气成藏规律及目标优选”(编号: 2008ZX05029-001)和中国石油塔里木油田公司项目“塔里木盆地震旦—寒武系白云岩优质储层发育展布规律与有利勘探区带选择”共同资助

张鹏: 1988年生。现于北京大学攻读博士学位,从事构造地质学研究。通讯地址: 100871 北京大学地球与空间科学学院; E-mail: smilezp_2008@163.com

分重要钻井)的岩心对寒武系构造裂缝进行观察与统计,岩性主要为泥粉晶白云岩,部分为中细晶白云

岩,泥岩、灰岩与砂岩偶见。因巴楚地区仅方1井钻遇目的层,缺乏可对比性,故暂不作统计。

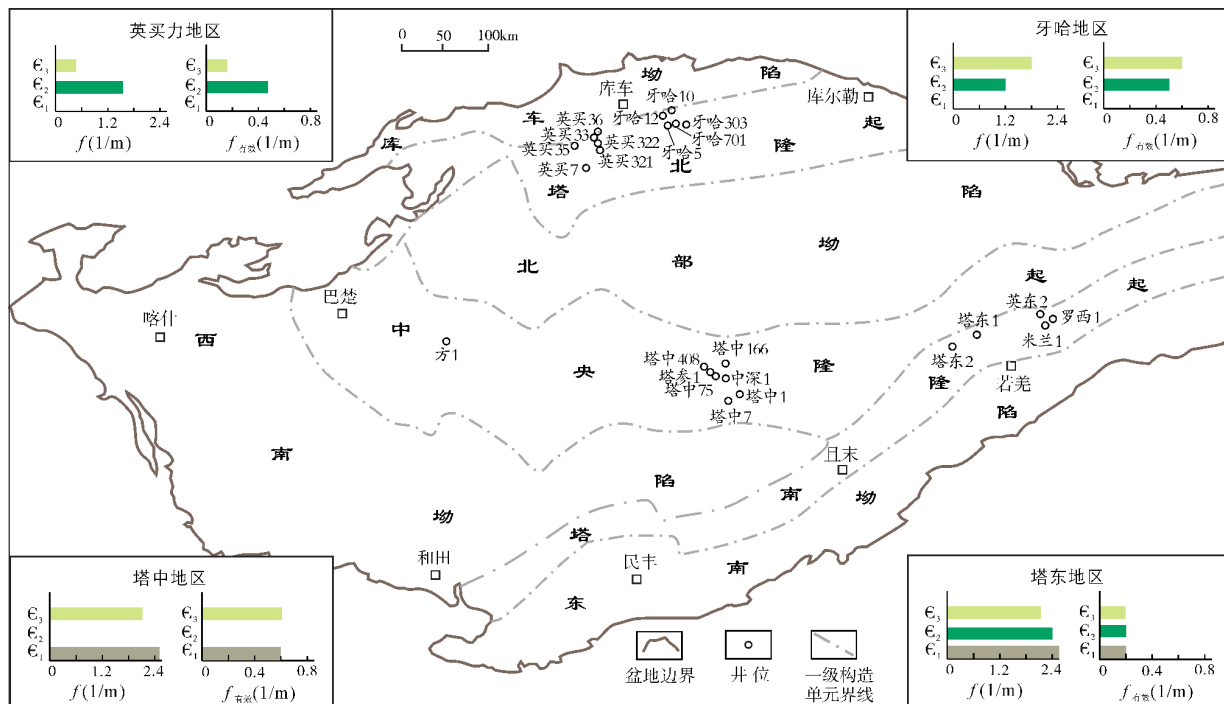


图1 塔里木盆地四个研究区位置与寒武系白云岩裂缝平均面密度分布图

f 加权裂缝平均面密度(1/m); $f_{有效}$ 加权有效裂缝平均面密度(1/m)

2 裂缝有效性统计

2.1 有效裂缝定义

前人对塔里木盆地寒武系—奥陶系白云岩的野外露头剖面、钻孔岩心进行了大量的观察采样及岩石薄片鉴定等工作,认为无论在出现的频率上还是在孔隙体积上,次生孔隙都占到95%以上,原生孔隙占比不到5%^[13];发育原生孔隙的白云岩,需要经过后期改造才能成为优质储层,裂缝就是一类重要的改造作用的产物^[14]。

受后期流体活动、沉积作用等影响,部分裂缝会被充填,无法成为油气运移通道或油气储集空间,这种裂缝称为无效裂缝;未被充填或半充填的裂缝,则仍可作为油气运移通道或油气储集空间,这些裂缝称为有效裂缝。有效裂缝对白云岩的改造起着重要作用,即裂缝有效性和裂缝密度是影响深部白云岩储层性能的重要因素。

2.2 裂缝有效程度——有效裂缝百分比

裂缝有效程度,是指所观察的特定岩心段内有效裂缝条数占裂缝总条数的百分比。

以盆地内四个地区上寒武统岩心裂缝观察统计(表1)为例,总体上深部白云岩裂缝多被充填,如塔中地区有效裂缝占比低于25%,仅部分区域有效裂缝相对较发育,如牙哈地区有效裂缝占比高于45%。

2.3 有效裂缝发育程度——加权有效裂缝面密度

裂缝密度反映了岩石的破裂程度,可以分为线密度、面密度和体密度。线密度是指与一直线相交的裂缝数目和该直线的长度的比值;面密度是指裂缝累计长度与流动横截面上基质总面积的比值;体密度是指裂缝总表面积与基质总体积的比值^[15]。线密度最易测量,但很难反映基质裂缝发育的程度;体密度最能反映基质裂缝发育情况,但较难测量;面密度

表1 塔里木盆地四地区上寒武统岩心有效裂缝统计

地区	井号	裂缝 总数 (条)	充 填 情 况			有效裂缝 总数 (条)	有效裂缝 百分比 (%)	岩 心 深度范围 (m)
			未充填 (条)	半充填 (条)	充填 (条)			
牙哈	牙哈 303	48	6	16	26	22	46	5922.3~5937.5
	牙哈 701	60	25	2	33	27	45	5773.0~5814.6
英买力	英买 35	21	3	0	18	3	14	5688.2~5896.0
	英买 7	58	3	17	38	20	34	5212.1~5471.9
塔中	塔中 408	107	3	13	91	16	15	4160.7~4685.1
	塔中 75	248	12	48	188	60	24	4515.3~4946.6
	塔中 1	199	2	6	191	8	4	4652.1~6067.2
塔东	英东 2	29	0	6	23	6	20	4171.9~4230.2
	塔东 2	65	0	0	65	0	0	4572.2~4771.3
	米兰 1	100	2	0	98	2	2	5250.8~5357.3

能在一定程度上反映基质裂缝发育的程度,同时也较易测量^[16],本文使用裂缝面密度来反映裂缝发育程度。具体到一段岩心,裂缝面密度^[17-18]为:

$$f = \frac{\sum l_i}{A} = \frac{\sum l_i}{2\pi r^2 + 2\pi r L} \quad (1)$$

式中: f ——面密度,1/m;
 l_i ——测点内第*i*条裂缝的长度,m;
 A ——岩心表面积,m²;
 r ——岩心半径,m;
 L ——岩心长度,m。

对储层段或一套地层的裂缝发育程度进行评价时,采用加权平均值,既考虑到了裂缝发育段,也兼顾了裂缝不发育段,这样可以反映研究层段裂缝的整体发育情况。与有效裂缝百分比相比,加权有效裂缝面密度可以反映研究层段有效裂缝的整体发育情况^[17-18],其表达式为:

$$f_{\text{加权有效}} = \frac{\sum f_{\text{有效}} \times L_i}{\sum L_i} \quad (2)$$

式中: $f_{\text{加权有效}}$ ——加权有效裂缝面密度,1/m;
 $f_{\text{有效}}$ ——第*i*块岩心的有效裂缝面密度,1/m;
 L_i ——第*i*块岩心的长度,m。

本次基于塔里木盆地四个地区28口钻井岩心观察,分别统计了寒武系上、中、下统的裂缝发育情况(表2,图1)。总体上,裂缝发育程度方面,塔中、塔东地区加权裂缝平均面密度较大,裂缝较发育,牙哈、英买力地区次之;有效裂缝发育程度方面,塔中地区

和牙哈地区加权有效裂缝平均面密度较大,英买力地区中寒武统也有一定优势。

3 裂缝发育特征及差异机制

如前所述,盆地内四个地区寒武系白云岩裂缝发育程度存在差异,这与构造活动的区域性差异有关,断裂活动强弱在很大程度上影响了裂缝的发育。塔中地区断裂较发育,区内有四条大型的断裂带^[19-23],次级断裂发育,钻遇寒武系的7口井位于断裂附近,上寒武统加权裂缝平均面密度达2.2;牙哈地区断裂相对不发育,区内仅发育一条相对大型的断裂^[24],次级断裂也不发育,上寒武统加权裂缝平均面密度为1.9。

四个地区有效裂缝发育程度的差异,除构造活动因素外,还与成岩环境和流体充填有关。潜山型裂缝发育区和内幕型裂缝发育区的流体类型存在差异;朱东亚等^[25]通过对碳氧同位素和锶同位素的分析认为,以牙哈地区为代表的潜山型裂缝发育区,流体主要为地层水和大气降水,部分为深部热液;以塔中地区为代表的内幕型裂缝发育区,流体主要为深部热液,与二叠纪岩浆活动有关。以上寒武统为例,从有效裂缝发育程度(加权有效裂缝平均面密度)看,塔中地区与牙哈地区相当,均为0.6,塔东地区仅为0.2(表2,图1);反映到裂缝有效程度(有效裂缝百分比)上,牙哈地区大于45%,明显高于塔中、塔东地区(小于25%)(表1)。这说明,内幕型裂缝发育区深部热液活动机制下裂缝更容易被充填,塔东地区由

表 2 塔里木盆地四地区岩心构造裂缝面密度统计

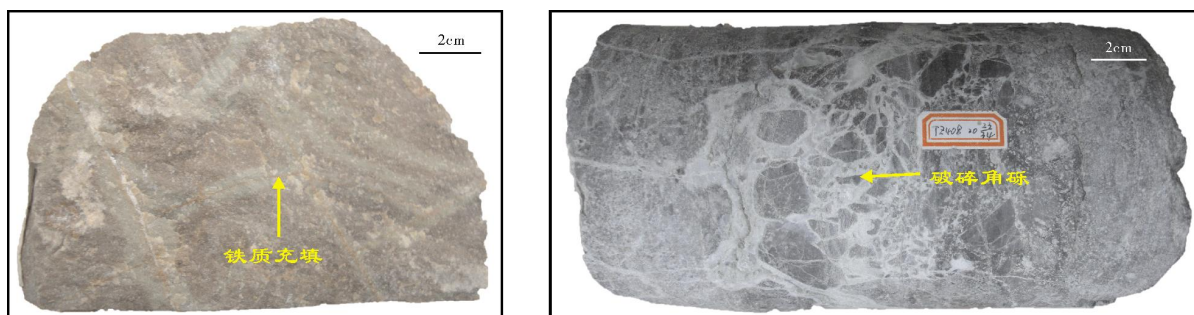
地 区 (发育裂缝类型)	井 名	上寒武统		中寒武统		下寒武统	
		加权裂缝 面密度	加权有效裂缝 面密度	加权裂缝 面密度	加权有效裂缝 面密度	加权裂缝 面密度	加权有效裂缝 面密度
牙 哈 (潜山型)	牙哈 15	0.4	0.1				
	牙哈 303	4.6	1.2				
	牙哈 701	0.8	0.4				
	牙哈 5			2.6	1.5		
	牙哈 12			0.4	0		
	牙哈 7×-1			0.5	0.3		
	牙哈 10			0.7	0.3		
	平均值	1.9	0.6	0.1	0.5	—	—
英买力 (潜山型)	英买 7	1.2	0.5	0.8	0.4		
	英买 32	0.1	0				
	英买 33	0.2	0.1				
	英买 35	0.8	0.1				
	英买 36	0.4	0	2.4	0.5		
	英买 321	0.2	0.1				
	英买 322	0.4	0				
	英买 323	0.4	0.4				
	英买 4	0.4	0.2				
	平均值	0.5	0.2	1.6	0.5	—	—
塔 中 (内幕型)	塔参 1	0.3	0.1				
	塔中 75	3.8	0.1				
	塔中 166	0.8	0				
	塔中 408	0.6	0.3				
	塔中 1	0.4	0.1				
	塔中 7	7.4	3.0				
	中深 1					2.6	0.6
	平均值	2.2	0.6	—	—	2.6	0.6
塔 东 (内幕型)	英东 2	1.0	0.2	3.1	0.5	3.1	0.4
	罗西 1	0.9	0.1			0	0
	米兰 1	4.1	0.5	4.1	0		
	塔东 2	2.1	0		0.4*	6.2	0.2
	塔东 1			0	0		
	平均值	2.0	0.2	2.4	0.2	3.1	0.2

* 塔东 2 井中寒武统未取心,加权有效裂缝面密度数据主要通过 FMI 统计

于寒武统内的流体与上部奥陶系内的流体不连通,这使得裂缝的有效性更差一些^[26-27]。

岩心观察可见裂缝的充填类型存在一定差异,这与流体类型的差异密切相关,潜山型裂缝发育区

以牙哈5井为代表,裂缝多为铁质、泥质充填,部分为方解石充填(图2a);内幕型裂缝发育区以塔中408井为代表,裂缝多为方解石等充填,多见热液流体作用残留的破碎角砾(图2b)。



(a) 细晶白云岩。裂缝内充填铁质。牙哈5井5918.6m, ϵ_{20} 岩心

(b) 细晶白云岩。热液流体改造裂缝, 形成破碎角砾。塔中408井4585.2m, ϵ_{30} 岩心

图2 潜山区(a)与内幕区(b)裂缝充填类型的差别

与不同地质时期的构造活动强度和流体活动情况相关, 各地区有效裂缝相对发育的层位也存在差异。牙哈地区集中在上、中寒武统, 英买力地区集中在中寒武统, 塔中地区上寒武统和下寒武统有效裂缝发育程度相当, 塔东地区寒武系各统有效裂缝发育程度均较低(图1)。塔中地区与牙哈地区上寒武统加权有效裂缝平均面密度均较大, 反映了裂缝对这里的白云岩储层有较好的改造作用, 具有较好的勘探潜力; 塔东地区有效裂缝基本不发育, 勘探前景相对较差。

目前研究区揭示深部白云岩的钻井较少, 使用部分钻井来预测区域裂缝发育规律有一定局限性, 随着勘探的深入和资料的积累, 对有效裂缝发育的研究将会更进一步。

4 结 论

(1) 基于岩心裂缝观察, 对有效裂缝发育程度(加权有效裂缝面密度)进行统计, 可以反映研究层段有效裂缝的整体发育情况。

(2) 塔中地区与牙哈地区上寒武统加权有效裂缝平均面密度较大, 反映了裂缝对白云岩储层有较好的改造作用; 英买力地区中寒武统有效裂缝相对发育; 塔东地区有效裂缝基本不发育。

(3) 有效裂缝发育程度的差异, 与潜山区和内幕区构造活动强度、流体活动类型及裂缝充填的差异有关。

参考文献

- [1] 马锋, 杨柳明, 顾家裕, 等. 世界白云岩油气田勘探综述[J]. 沉积学报, 2011, 29(5): 1010-1021.
- [2] 焦存礼, 邢秀娟, 何碧竹, 等. 塔里木盆地地下古生界白云岩储层特征与成因类型[J]. 中国地质, 2011, 38(4): 1008-1015.
- [3] SUN S Q. Dolomite reservoirs: Porosity evolution and reservoir characteristics[J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(2): 186-204.
- [4] 秦启荣, 苏培东. 构造裂缝类型划分与预测[J]. 天然气工业, 2006, 26(10): 33-36.
- [5] 张厚福, 方朝亮, 高先志, 等. 石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- [6] 崔海峰, 滕团余, 郑多明, 等. 英买力—牙哈地区碳酸盐岩潜山的油气成藏模式[J]. 高校地质学报, 2009, 15(1): 100-107.
- [7] 沈安江, 王招明, 郑兴平, 等. 塔里木盆地牙哈—英买力地区寒武系—奥陶系碳酸盐岩储层成因类型、特征及油气勘探潜力[J]. 海相油气地质, 2007, 12(2): 23-32.
- [8] 贾承造, 魏国齐. “九五”期间塔里木盆地构造研究成果概述[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(1): 11-14.
- [9] 戴福贵, 杨克绳, 刘东燕. 塔里木盆地地震剖面地质解释及其构造演化[J]. 中国地质, 2009, 26(4): 747-760.
- [10] 阳怀忠. 塔里木盆地中央隆起带隆坳格局变迁及其构造控制机制分析[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010.
- [11] 杨帆, 孙玉善. 塔里木盆地主要气藏储层特征[J]. 天然气工业, 1999, 19(2): 43-49.
- [12] 赵宗举, 周新源, 范国章. 塔里木盆地塔中地区主要构造圈闭形成期分布及成藏意义[J]. 海相油气地质, 2006, 11(2): 1-8.
- [13] 朱井泉, 吴仕强, 王国学, 等. 塔里木盆地寒武—奥陶系主要白云岩类型及孔隙发育特征[J]. 地学前缘, 2008, 15(2): 67-79.
- [14] 强子同. 碳酸盐岩储层地质学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 1998.
- [15] VAN GOLF-RACHT T D. 裂缝油藏工程基础[M]. 陈钟祥, 译. 北京: 石油工业出版社, 1989.
- [16] 魏永佩, 张之一. 油气田裂缝密度定量研究方法[J]. 地球科学与环境学报, 1991, 13(1): 37-40.
- [17] 张庆莲, 侯贵廷, 潘文庆, 等. 新疆巴楚地区走滑断裂对碳酸盐岩构造裂缝发育的控制[J]. 地质通报, 2010, 29(8): 1160-1167.

- [18] 张鹏,侯贵廷,潘文庆,等. 新疆柯坪地区碳酸盐岩对构造裂缝发育的影响[J]. 北京大学学报:自然科学版,2011,47(5):831-836.
- [19] 雷克辉,钟宁宁. 塔中 I 号断裂坡折带及其邻区礁滩体发育的区域构造-沉积背景和古地貌控制作用[J]. 海相油气地质,2012,17(4):16-22.
- [20] 邹光辉,杨海军,屈泰来,等. 塔里木盆地塔中隆起断裂系统特征及其对海相碳酸盐岩油气的控制作用[J]. 岩石学报,2012,28(3):793-805.
- [21] 陈清清. 塔中隆起带早古生代构造样式和构造演化研究[D]. 北京:中国地质大学,2007.
- [22] 丁文龙,樊太亮,黄晓波,等. 塔中地区中—下奥陶统古构造应力场模拟与裂缝储层有利区预测[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2010,34(5):1-6.
- [23] 胡德胜. 塔里木盆地塔中隆起带主干断裂系统及其油气地质意义[D]. 武汉:中国地质大学,2010.
- [24] 崔泽宏,王志欣,汤良杰,等. 塔北隆起北部正断层的成因机制及地质意义[J]. 西安石油大学学报:自然科学版,2006,21(1):1-6.
- [25] 朱东亚,孟庆强,胡文瑄,等. 塔里木盆地塔北和塔中地区流体作用环境差异性分析[J]. 地球化学,2013,42(1):82-94.
- [26] 陈园园,王国芝,王东,等. 塔东古生界储层中流体包裹体特征[J]. 沉积与特提斯地质,2009,29(4):68-72.
- [27] 王东,王国芝,冉启贵,等. 塔东地区古城 4 井上寒武统—中上奥陶统流体地球化学示踪[J]. 现代地质,2008,22(4):586-591.

编辑:董庸,金顺爱

Development Characteristics of Structural Fractures in Cambrian Dolostone, Tarim Basin

Zhang Peng, Hou Guiting, Pan Wenqing, Qi Yingmin,
Zhang Qinglian, Meng Qingfeng

Abstract: The method of weighting areal density of effective fractures can be used to reveal the development characteristics of effective fractures in whole target strata. Based on the observation of the dolostone cores from 28 wells in Yaka, Yengimahalla, Tazhong and Tadong areas in Tarim Basin, statistics and analysis have been done respectively to the dolostone structural fractures in the Upper, Middle and Lower Cambrian strata. It is indicated that as for the development of structural fractures, the average weighting areal density of fractures in the inner buried-hill fracture zones (in Tazhong and Tadong areas) is larger than that in the buried-hill zone (in Yaka and Yengimahalla areas). As for the development of effective fractures, the average weighting areal density of fractures is large in Upper Cambrian strata in both Tazhong area and Yaka area, which emerges preferable reformation of these fractures to dolostone reservoirs. The effective fractures are relatively developing only in Middle Cambrian strata in Yengimahalla area while are not in Upper, Middle and Lower Cambrian strata in Tadong area. It is concluded that the difference in areal density of effective fractures is closely related with local tectonic activities, fluid activities and fracture fillings in the buried-hill zone and the inner buried-hill zone.

Key words: Cambrian; Dolostone; Structure fracture; Fracture characteristics; Effective fracture; Fracture density; Tarim Basin

Zhang Peng; male, DSc. degree in progress at Peking University. Add: School of Earth and Space Sciences, Peking University, 5 Yiheyuan Rd., Beijing, 100871, China