

文章编号: 1000-0550(2011)02-0363-11

黄河三角洲现代泥质沉积物非构造裂缝空间展布研究^①

成 玮¹ 周瑶琪¹ 闫 华²

(1. 中国石油大学地球化学与岩石圈动力学开放实验室 山东东营 257061; 2. 胜利油田地质科学研究院 山东东营 257061)

摘 要 通过对黄河三角洲现代泥质沉积物非构造裂缝进行实地考察观测、室内数据处理、实验分析等,分别针对水下收缩裂缝、干燥裂缝和混合成因裂缝,研究其空间展布特征和规律,详细探讨了3种裂缝的定量分级、分形特征、平面及剖面生长特征等,并且建立了不同类型现代泥质沉积物非构造裂缝的形成模式。本研究对于建立不同类型泥质沉积物非构造裂缝系统的定量化的描述和对比标准有重要意义。

关键词 泥质沉积物非构造裂缝 黄河三角洲 空间展布 定量描述 形成模式

第一作者简介 成玮 男 1986年出生 硕士研究生 地球化学 E-mail: warriormole@163.com

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

随着勘探难度的增加,泥岩裂缝性油气藏等非常规油气藏越来越受到人们的重视^[1~6]。泥岩裂缝可分为构造裂缝和非构造裂缝,非构造裂缝是指由非构造因素诱发行成的与构造应力无关或间接有关的裂缝类型^[7~9]。

现代泥质沉积物非构造裂缝主要包括水下收缩裂缝和干燥裂缝两种,国内外学者已经对其进行了卓有成效的探索和研究^[7~23],然而多数只针对其中一种裂缝展开讨论,且量化程度低,尚缺乏综合性、量化的研究。本文以黄河三角洲古河道为研究工区,分别针对水下收缩裂缝、干燥裂缝和首次提出的混合成因裂缝,进行了定量分级、分形特征、生长特征和形成模式等方面的研究,建立了不同类型现代泥质沉积物非构造裂缝的定量描述和对比标准。

1 工区介绍

野外工区均位于黄河三角洲湿地园内主要公路旁(图1),经纬度为N37°43'34",E119°12'39",海拔为-1 m左右。图1所示上方土黄色线条为黄河河道,下方为黄河古道,古道近陆一侧已经遭到人工改造。工区及其周围较大范围内沉积物为土黄色泥质,含砂极少,暴露的沉积物表面由于蒸发有盐析出呈斑白状;沉积水体多处于停滞状态,呈黄绿色;区内植物繁盛,大面积发育芦苇;挖掘沉积物可见内夹黑色淤泥,有腥臭味,富含有机质,多见发育垂直于层面的虫管。可以推断其原始沉积环境应为三角洲平原亚相的沼

泽沉积,该环境有利于泥质沉积物非构造裂缝的发育和研究^[8,9]。



图1 野外工区位置图(来源: Google Earth)

Fig. 1 Location of the study area (from Google Earth)

1976年黄河改道后,古道入海口岸线开始蚀退;1990年后,黄河泥沙供应大量减少,加之人工干预使黄河独流入海和海平面平均5 mm/a的上升速率等因素,现在除河口泥沙在有限范围内堆积造陆外,黄河沿岸大范围内普遍表现为蚀退^[24]。由图1可以看到由于人工防潮堤公路的修建,有效地阻止了潮水向陆的进一步侵蚀,因而研究工区内原始沉积环境的改变也较弱。

2 裂缝分类描述

黄河口现代泥质沉积物非构造裂缝可分为:水下

^①国家自然科学基金项目(批准号:40872095)资助。
收稿日期:2009-09-28; 收修改稿日期:2010-03-05

收缩裂缝、干裂和混合成因的裂缝。下面分别详述各工区的各类裂缝及它们的平面、剖面特征。

2.1 水下收缩裂缝

水下收缩裂缝以0#工区为代表,0#野外工区为一与主要公路平行的近北西—南东方向延伸的狭长水沟(图版I-1),其平均宽度约为3 m,长近百米,选自东边水最浅处向西70.6 m段为研究对象。

P1至P7点为自西向东,水体由深变浅的一系列观测点,P1点及其以西由于水体较深未见裂缝发育。从P2点至P7点,裂缝的发育程度依次增强,通过对水体中心深度、岸边坡角等参数的测量(表1)得出以下结论:除去P1,数据明显分为2组:P2、P3、P4为a组,水深较深,坡角较大,典型裂缝照片见图版I-2;P5、P6、P7为b组,水深较浅,坡角较小,典型裂缝照片见图版I-3。a组裂缝处在发育的初级阶段,裂缝刚刚开裂,裂缝壁圆滑呈弧形(图2a),处于水下裂缝的初级形成阶段;b组裂缝如P6和P7底部裂缝完全裂开,底部裂缝剖面形态示意图(图2b),处于水下裂缝的高级阶段。整体上0#水下收缩裂缝宽度较大、无次级裂缝发育。

表1 0#工区各观测点水体参数

Table 1 Water factors of each observation point in 0# field

观测点编号	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
中心水深/cm	>50	30.0	24.0	37.9	20.1	13.0	2.5
岸边坡角/°	20.0	5.7	9.2	14.7	11	4.9	5.0

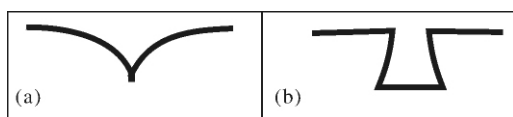


图2 水下裂缝剖面示意图

(a: P2, P3, P4; b: P6, P7 底部裂缝剖面形态)

Fig. 2 Subaqueous crack section (a: P2, P3, P4;

b: P6, P7 sectional crack shapes at the bottom)

P1至P7点这7个观测点同处于一个连通水体中,他们的温度、盐度及其他化学条件环境是相同的,唯一的区别在于它们所处位置的水体深度,由以上水体深度数据、裂缝描述及裂缝形态照片分析可知:对于水体长期覆盖的水下裂缝来说,水体深度是影响其裂缝形成及发育状况的主要因素。由P1到P7这些观测点仿佛为我们展现出了水下裂缝发育的一个动态的过程:可以想见,当P1、P2等发育程度较低的位置,将来如果水平面高度进一步降低,也会发育到现

在所观测到的P6和P7这样的高级阶段。由这样的一个假象的动态过程可以推测:对于水下收缩裂缝,泥质的排水是一个动态的平衡过程,水体逐渐地减少,下伏泥质孔隙水逐渐排出。孔隙水的动态排出可能跟泥质孔隙水的异常压力不断释放有关,也可能与上覆水体和泥质孔隙水的盐度动态平衡有关,对于后者,则需要通过对野外裂缝发育进行动态的长期监测来确定。

2.2 干裂

3.2.1 2#工区(图版I-4)

2#工区处于干裂形成的初始阶段,裂缝大部分已连接成网状,裂缝形态较为平滑,边缘有轻微翘起现象。次级裂缝不发育。基块面积较小,部分基块因脱水程度较高或盐类物质析出而颜色变浅。

2.2.2 4#工区(图版I-5)

4#工区裂缝处于干裂的高级阶段,发育程度非常高。发育多级次级裂缝,平面上裂缝边缘大都呈锯齿状,裂缝已经完全连接成片,基块边缘向上卷曲,基块表面有生物爬迹分布;剖面上:裂缝的延伸深度为4~6 cm,裂缝的剖面形态为“V”字形,由于脱水作用使剖面上部变干,裂缝延伸到某个深度便中止,且此深度处发育横向裂缝,因而可将裂缝基块完整剥离出来。

2.3 混合成因的裂缝

混合成因的裂缝不同于单一成因的水下裂缝或干裂,而是在水下条件和干裂的共同作用下形成的,往往是在前期的水下收缩裂缝基础上发育新的干燥裂缝。下面以1#工区和3#工区为例详述之。

2.3.1 1#工区混合成因裂缝描述(图版I-6)

1#工区为一个面积为24.6 m²的近似梯形的多边形。工区原岸边坡度小于5°,极为平缓,主要发育网状裂缝:水中主裂缝发育,次级裂缝不发育,为水下收缩裂缝;暴露处在主裂缝的基础上次级裂缝发育较好,推测为干燥作用导致的次级裂缝,而非干裂,分析见后。

2.3.2 3#野外工区混合成因裂缝描述(图版I-7)

3#野外工区形态为一复杂多边形,底层发育被沉积物充填的水下裂缝,其上叠置有后期暴露形成的干裂。基块颜色为土黄色,被充填裂隙表面由于含水多后期暴露蒸发清晰可见白色盐分。此工区的裂缝形成方式推测为:裂缝形成的初始阶段发育水下收缩裂缝,后裂缝经沉积物充填,最终由于水体变浅,基块暴露,形成后期的干裂。

2.4 不同类型裂缝发育条件分析

本次观测的 0#~4#工区位置极为相近,它们所处的沉积环境是相同的,但是为什么会形成如此多种多样的裂缝类型?与之前对水下裂缝不同阶段的分析类似,各个工区的位置如此相近,它们的主要差别在于工区水体的深度 H 和 水体体积 V (对于现在已经暴露的裂缝区域来说, H 和 V 值为之前有水体覆盖时的深度和体积)。

0#工区与 1#工区 H 相近,但是 $V_{0\#} \gg V_{1\#}$,其他工区间的参数对比: $H_{1\#} > H_{3\#}$, $H_{3\#} > H_{2\#} \& H_{4\#}$,总结如图 3:

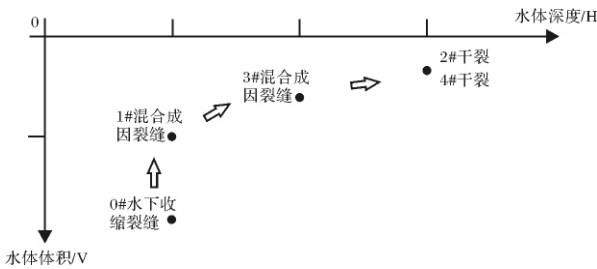


图 3 裂缝类型与水体参数的关系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of relationships between crack types and water body parameters

对于水体较深,水量多的水洼来说,其下富含水的泥质也较多,具备形成水下裂缝的条件,而对于 2#和 4#这两个工区富含水的泥质和上覆水体厚度都非常小,因而只能且易于发育干裂,这是两种极端的情况;同时,对于水体参数介于两者之间的区域来讲,他们发育各种混合成因裂缝的可能性则更高。

因此可以总结出一个规律,随着形成裂缝的水洼深度和总体积的减小,裂缝的发育类型由单纯的水下收缩裂缝,变化为混合成因的裂缝,最终过渡到干裂。在这几种类型中,有些是可以相互转化的(如 0#到 1#工区),有些则不能(如 0#不可能转化为纯干裂)。

3 裂缝的统计变化规律

以下试图以对不同野外工区面积定量分级和裂缝分形维值的研究来揭示不同条件下的裂缝的特征及变化规律。

3.1 面积定量分级

通过对各个工区的基块面积的统计进行定量分级,采取统一的分级标准:一级:大于 500 cm^2 ;二级:200~500 cm^2 ;三级:50~200 cm^2 ;四级:小于 50 cm^2 。各工区的裂缝面积分布情况见图 4:

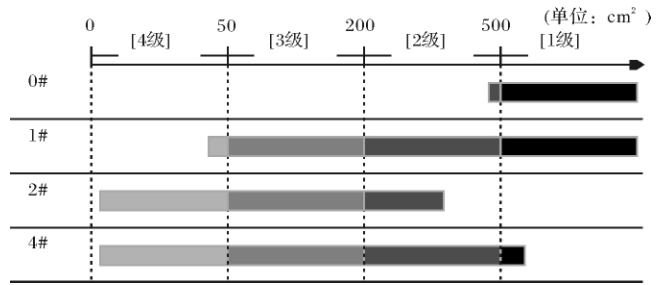


图 4 各工区裂缝基块面积分布图

Fig. 4 Crack unit area distribution of each work area

由图 4 可知 0#工区裂缝面积分为两级,但绝大多数基块面积在 500 cm^2 以上,分布范围较窄。1#工区同 0#工区一样经历过水下收缩裂缝阶段,因此可见高级裂缝基块面积的分布相似,但是由于 1#工区后期暴露,次级裂缝大量发育,因而 1#工区基块面积分布范围较广。1#和 2#的面积分布区间跨度相似,但是 2#的各级面积均小于 1#。对比 2#和 4#,可知 4#的裂缝级数多,处于裂缝发育的高级阶段。分析得出结论:在相邻地区干裂的最高级基块面积一般比水下裂缝的裂缝基块面积要小,同时,干裂的次级裂缝发育程度也比后者好得多。对于混合成因裂缝和干裂,发育程度越高,面积分级也越复杂。裂隙发育到最后阶段,会呈现多级裂缝混合存在的状况,如能正确区分各级别裂缝的分布状况,对于区域地质研究,特别是泥岩原生裂缝储集层油气开采具有重要的指导意义。

3.2 裂缝的分形特征

Mandelbrot B B 于 1973 年首次提出了分形的概念,用来表征某一物体自相似性的复杂现象。现在,分形科学及其他非线性科学被广泛地应用于各种复杂裂缝的研究之中(包括天然裂缝、人工诱导裂缝等)^[25~28],分维度能充分反映裂缝的疏密程度、拉张程度及裂缝的各向异性,因而比线密度和面密度等裂缝发育程度指标更合理。

选择覆盖法确定裂缝分维度:首先在裂缝发育的地区选取具有代表性且大小适宜的正方形区块,将其分割为边长为 r 的若干正方形,同时确定出存在裂缝的正方形格数 N 。然后不断改变 r 的取值,并且分别记录下每次取值对应的含裂缝正方形格数。最后通过对若干组 $\ln(N)$ 和 $\ln(r)$ 进行线性回归,当相关系数的平方大于 0.97 时可认为回归直线斜率的绝对值即为分维度值^[28]。

通过对各类典型裂缝工区测算分维度值,建立表

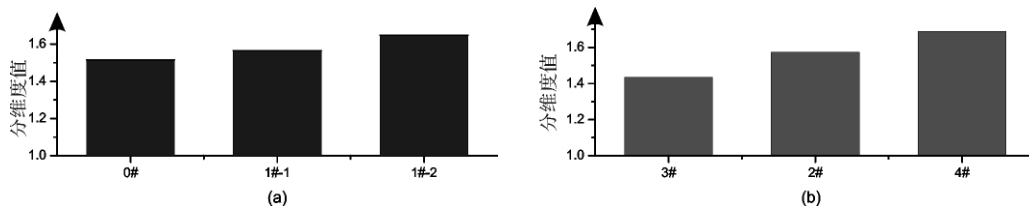


图5 各工区裂缝分维值对比图

Fig.5 Comparison of fractal dimension of each field

2,所有工区分维度值线性回归相关系数平方值均大于0.97,可信度高。数据呈现出明显的规律性。

表2 各工区分维度值D与相关系数R²表

Table 2 Fractal dimension and correlation coefficient of each field

工区	工区裂缝特征	分维度值 D	相关系数平方 R ²
0#	水下收缩裂缝	1.5157	0.9865
1#-1	混合裂缝的水下部分	1.5630	0.9870
1#-2	混合裂缝的暴露部分	1.6400	0.9903
2#	干裂发育阶段	1.5738	0.9864
3#	干裂初级阶段	1.4353	0.9708
4#	干裂完全阶段	1.6888	0.9911

如图5(a)所示,1#-1与0#同为水下收缩裂缝,但由于1#-1基块面积较小,或者说裂缝的面密度较大,因而分维度较高,而1#-2为暴露阶段,次级裂缝的发育增强了裂缝的连通程度,其分维度也远远高于前两者。同样对于图5(b),3#的裂缝的发育尚处于初级阶段,裂缝并没有完全连接成片,也即初级裂缝基块没有完全形成,所以分维度值甚至低于0#;2#和4#发育程度依次增高,因此分维度也相应升高,4#的分维度值接近1.7,连通性非常好。

由上面分析可知,裂缝的分形维值从水下收缩裂缝到暴露阶段和干裂随着发育程度有逐渐变大的趋势,这表明分形理论能够很好地描述裂缝的疏密程度、复杂程度和连通性,因而可以定量地表征裂缝发育地层的裂缝发育程度,描述裂缝作为储集空间和运移通道的能力。

4 裂缝生长特征分析

4.1 裂缝平面生长

经过观察研究发现,干燥裂缝与水下收缩裂缝具有相似的平面生长特征。本次研究针对裂缝的生长角度进行了详细的测量,以期揭示泥质沉积物非构造裂缝的生长规律。

4.1.1 新开裂裂缝角度分析

顾名思义,新开裂的裂缝是指在原有裂缝基础上发育的新裂缝(图版I-8),新裂缝开裂角度统计数据见表3。

表3 裂缝单边开裂角度统计

Table 3 Statistics table of new crack generation angles

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
顺时针/°	94	97	87	71	99	84	101	90	102
逆时针/°	123	100	123	109	80	115	101	90	78
总和	217	197	210	180	180	199	202	180	180
编号	10	11	12	13	14	15	16	17	
顺时针/°	95	114	88	76	105	110	112	92	
逆时针/°	95	98	92	104	101	70	92	114	
总和	190	212	180	180	206	180	204	206	

注:顺时针角度代表新裂缝顺时针方向到主裂缝的角度;逆时针角度代表新裂缝逆时针方向到主裂缝的角度。

由表3和图6知单边开裂方式的顺时针角度最大值为112°,最小值为71°,平均值为95°;逆时针角度最大值为123°,最小值为70°,平均值为98°;顺时针角度和逆时针角度的大小相当。两者总和的最大值为217°,最小值为180°,平均值为187°,可见单边开裂方式裂缝到主裂缝顺、逆时针角度之和均大于180°,即新裂缝的开裂总是在原裂缝拐点处沿着凸出的方向,且与原裂缝的夹角不会小于70°。

4.1.2 裂缝生长角度分析

裂缝生长角度是指裂缝在向前延伸的过程中改变方向时新生长方向与原生长方向的夹角(图版I-8),实际测得裂缝生长角度数据见表4。

由表4得到裂缝生长角度范围为20°~70°,平均值大约为43°。即裂缝都是在此范围内改变生长轨迹(图7)。

表4 裂缝生长角度统计

Table 4 Statistics of crack growth angles

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
角度/°	37	52	52	68	47	62	64	42	48	34	32	29
编号	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
角度/°	41	37	42	58	52	49	28	21	44	30	35	21

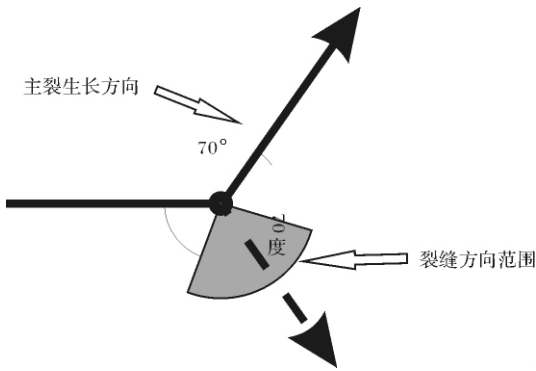


图 6 裂缝单边开裂模式图

Fig. 6 Model of crack generation angles

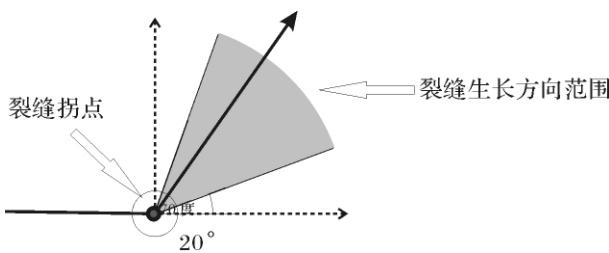


图 7 裂缝生长角度模式图

Fig. 7 Model of crack growing angles

与裂缝开裂方式相对比可以发现,裂缝生长轨迹改变角度均小于 70° ,而单边开裂产生新裂缝的角度则都大于 70° 。 70° 好像成为这两者之间的分界点,同时又证明两者之间存在紧密的联系,下面试图介绍一种理论解释这种现象。

4.1.3 裂缝的非线性生长模式

在泥质层脱水收缩时,收缩应力通常以一点为中心,形成收缩圆。在两个收缩圆相切部位,往往出现新的裂隙。同时,相邻收缩圆的共同作用,导致裂隙基块形状接近于网状,发育网状收缩裂隙,属于裂缝的非线性生长模式。

如图 8(a) 为裂隙开裂的不规则模型,裂缝两拐点间距离一般不相同,裂隙的生长方向和开裂方向也是变化较大的,在某一个范围内波动^[29]。因为现实中的沉积物沉积大多数是不均匀的,所以这种模式的裂缝发育广泛。图中圆形代表泥质沉积物集合体或收缩圆。图 8(b) 为裂隙开裂的规则模型,其两拐点间距离近乎相等,裂隙走向也呈规律性变化,这种模型主要发育在小范围内沉积物沉积相对均质的区域。

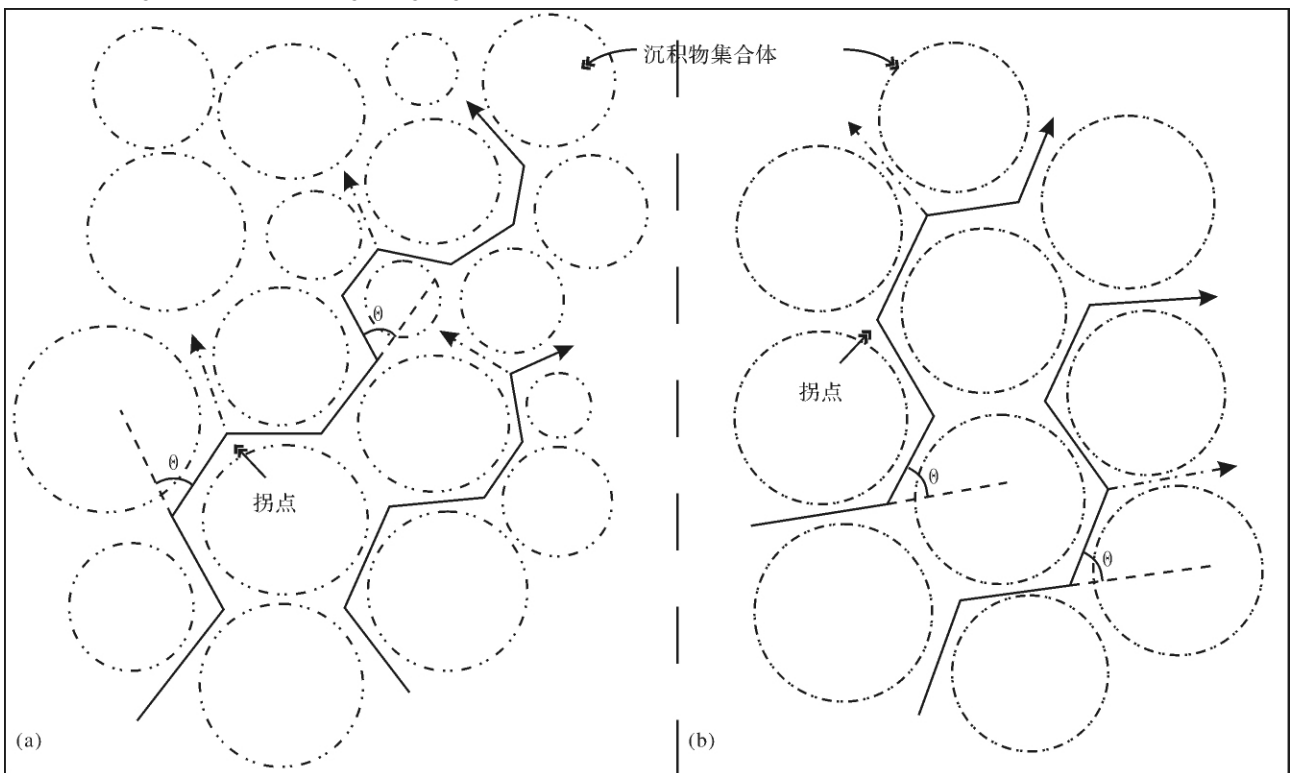


图 8 裂隙生长的不规则模型(a)和规则模型(b)(参考文献[12])

Fig. 8 Irregular (a) and regular (b) models of crack development

注: 实线为裂缝生长轨迹; 点虚线为新裂缝开裂方向;

由上可知,沉积物颗粒的均质程度及其排列方式是产生裂隙形状差异的主要原因。

前面提到裂隙的生长方向和新裂隙开裂方向的区别,由收缩圆理论可以推知,裂隙在生长过程中,总是会沿着改变最小的方向生长,只有这样,裂隙两侧的张应力才能得到最大程度的释放,从而达到稳定状态。而新开裂的裂隙已经属于次一级的裂隙了,它会选择拐点处另一个方向开始生长(图8点虚线所示),因而也就解释了实测裂隙生长角度和新开裂角度的区别和界限。

4.2 裂隙剖面生长模式

不同于平面生长方式,水下收缩裂隙和干裂隙的剖面生长模式存在着本质的不同。

4.2.1 水下收缩裂隙

水下收缩裂隙的开裂是从基块底界某点或者说收缩球体的底部(平面上解释为收缩圆,三维空间内应该看作收缩球体)开始生长,并逐渐向上延伸的过程,这种裂隙结构,将切穿整个泥质沉积物层,从剖面上看类似于断层的花状构造(图版 I-9)。

4.2.2 干裂

干裂是由于干旱蒸发而产生的,沉积物的上部最先受到影响,因此与水下收缩裂隙不同,干裂是从沉积物表面开始逐渐向深处发育,顶部的缝宽最大,裂隙的剖面形状呈的V字形,由于受到蒸发作用影响的深度比较浅,干裂的深度也是相对较浅的,有的干裂发育到一定程度可以成块状翘起(图版 I-10)。

5 现代泥质沉积物非构造裂隙的形成模式

通过对以上现代泥质沉积物非构造裂隙的平面、剖面几何特征、统计分形特征及裂隙生长方式的综合分析,分别探讨了干燥裂隙、水下收缩裂隙及混合成因裂隙的形成模式,建立了各类裂隙间的相互联系、转化的关系。

5.1 干燥裂隙的形成模式(实例:2#、4#工区,图9,图版 I-4、I-5)

I 在蒸发作用较强的地区和(或)季节,泥质沉积物上覆水体消退,受到阳光照射的直接作用;

II 表层泥质沉积物孔隙水大量蒸发,泥质脱水收缩,在一定的位置上当收缩张应力超过了泥质的破裂极限,泥质沉积物便由上至下呈“V”字型开裂;

III 继续的蒸发作用使得裂隙不断向下延伸,但是由于阳光、温度的作用深度有限,在某个深度下裂

缝不再继续生长。在纵向裂隙底部发育有横向裂隙,裂隙基块边缘开始向上翘起;

IV 干裂发育的晚期,多数横向裂隙已经能够相互连通,裂隙基块由开始的两边翘起变成强烈的卷曲(程度取决于光照强度和作用时间),并且次级裂隙已经大量开始生长。

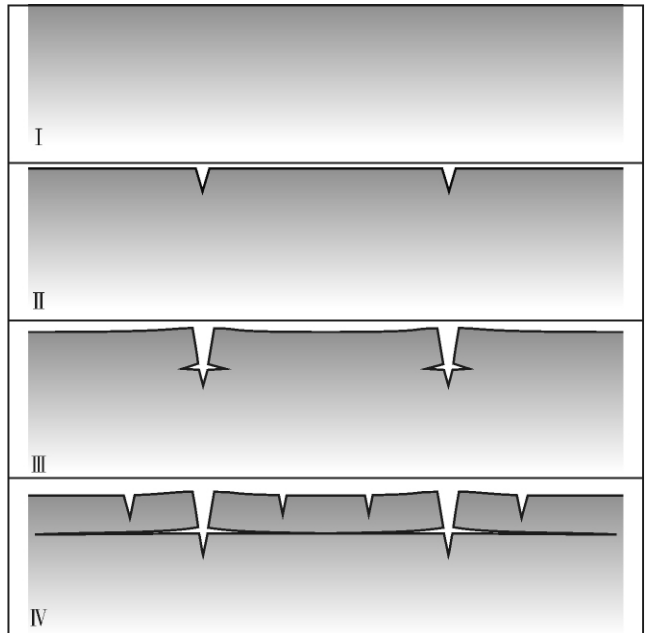


图9 干燥裂隙的形成模式

Fig. 9 Development model of desiccation cracks

5.2 水下收缩裂隙及混合成因裂隙的形成模式(图10)

a 裂隙形成初始条件

在潮坪、河漫滩等具有泥质大量沉积并且周期性暴露条件的地区,在一次大的风暴潮或者洪泛期之后,低洼处往往快速堆积了大量的富含孔隙水的泥质,此时沉积水体较厚,泥质处于稳定状态;

b 水下裂隙开始形成阶段

初期的压实作用加之快速堆积、孔隙水排出不畅导致泥质具有一定的异常高孔隙压力。当蒸发作用致使水平面下降到一定程度,某个深度处泥质的异常高压与上覆沉积物和水压之差超过了此处泥质的破裂极限时,泥质层开始由下向上逐渐开裂。裂隙在三维空间内呈网状开裂,裂隙基块开始形成,箭头所示为裂隙生长方向;

c 水体长期覆盖地区收缩裂隙发育模式(实例:0#工区,图版 I-2)

对于水体较深且长期处于水体覆盖的区域,水平

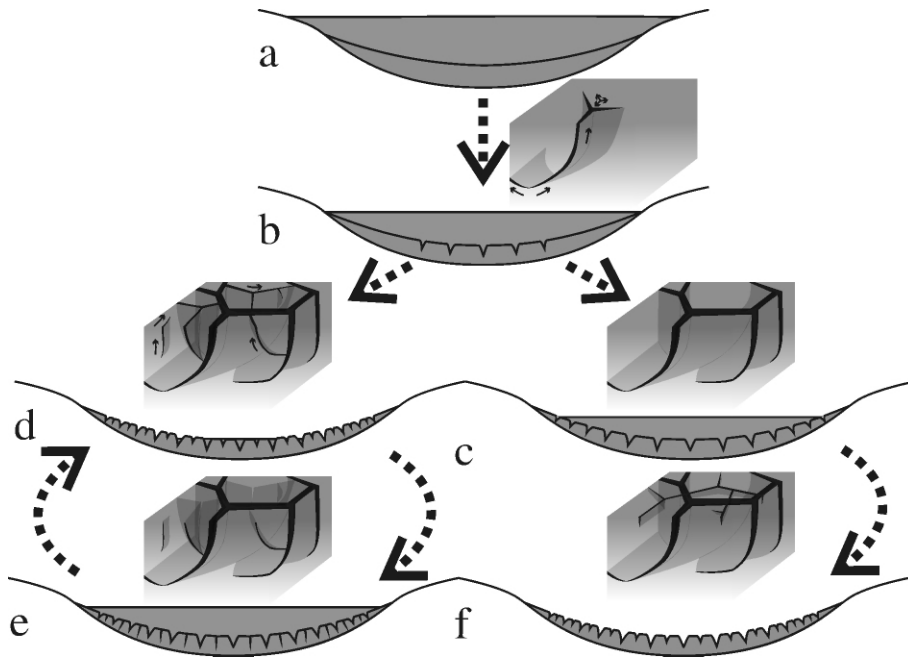


图 10 水下收缩裂缝及混合成因裂缝形成模式图

Fig. 10 Development model of subaqueous shrinkage cracks and mixed genesis cracks

面的下降程度(水体没有干涸)使得主裂缝的开裂已经将高压孔隙水完全排出,而基块内部的泥质孔隙水已经不存在异常高压或者相对较低的孔隙压力还没有达到释放的条件,因而不具备产生次级裂缝的条件;

d 周期性暴露地区收缩裂缝发育模式(实例:1#工区,图版 I-6)

对于水体较浅且周期性处于暴露环境下的区域,在暴露阶段次级裂缝可以大量发育,此时次级裂缝的发育可能跟基块内泥质压力的释放或者暴露干燥表层水分蒸发因素有关。

e 周期性暴露地区收缩裂缝发育模式(实例:1#工区,图版 I-6)

经过 d 阶段的裂缝区域如果再次接受水的补给,部分开裂程度不高的次级裂缝可能会再次关闭。周期性暴露的区域的 d 和 e 过程可能会多次循环出现,裂缝也随之周期性地开启和封闭。

f 水下收缩裂缝之上叠加干裂缝(实例:3#工区,图版 I-7)

对于水体更浅的区域来说,首先经历了 c 阶段发育的水下收缩裂缝,但接下来并没有发育类似 1#工区暴露区域的次级裂缝,而是干燥裂缝完全叠置于水下收缩裂缝之上,干燥裂缝与其下伏的水下收缩裂缝构成 2 个独立的裂缝系统。

讨论

从 c—d—e—f 到纯粹的干裂这几种同时存在的裂缝状态,是在上覆水体由多到少或者说蒸发作用由弱到强的条件下形成的,它们可以同时存在,某些裂缝在条件改变时也能够发生转化。可以设想,在更复杂的气候条件下,有可能会形成更复杂的混合成因裂缝,多期、不同成因的裂缝叠加在一起,后期的裂缝可能会改造原有裂缝,或者多期裂缝同时赋存,这还有待于进一步的考察证实。

6 结论与问题

(1) 对三角洲古河道附近的泥质沉积物非构造裂缝进行了研究,将其分为三类:干裂缝、水下收缩裂缝和混合成因裂缝。

(2) 裂缝的面积分级和分维度的计算都可以一定程度上定量反映裂缝的发育程度。

(3) 干燥裂缝与水下收缩裂缝具有相似的平面生长特征,这可以用非线性生长模式的收缩圆来解释;剖面上,水下收缩裂缝从收缩块体底部开始生长,呈现类似“花状构造”,而干裂缝从顶面向下生长,呈 V 字型,且于一定深度处底部会平行于层面裂开并相互连接起来。

(4) 分别建立了干裂、水下收缩裂缝和混合成因裂缝的形成模式,并对不同类型的裂缝的形成条件和

过程进行了分析,探讨了各种裂缝直接相互联系、转化的关系。

(5) 虽然现在已经对现代泥质裂缝的空间展布有了较深的了解,但是对于裂缝发育的影响因素、尤其是各种边界条件对裂缝的发生、发育的控制作用,仍然没有细致可靠的研究。在接下来的研究工作中,如果能够进行裂缝模拟实验,通过控制单因素、多因素变化来分析裂缝发生、发育规律,将会取得更好的成效。

参考文献(References)

- 张金功,袁政文. 泥质岩裂缝油气藏的成藏条件及资源潜力[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(4): 336-338 [Zhang Jingong, Yuan Zhengwen. Formation and potential of fractured mudstone reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(4): 336-338]
- 曾联波, 谢淑蓉. 低渗透储集层中的泥岩裂缝储集体[J]. 石油实验地质, 1999, 21(3): 267-230 [Zeng Lianbo, Xiao Shurong. Fractures in the mudstone of tight reservoirs [J]. Experimental Petroleum Geology, 1999, 21(3): 267-230]
- 甘秀娥. 低孔低渗砂岩储层裂缝发育程度与产能关系[J]. 天然气工业, 2003, 23(5): 41-44 [Gan Xiue. Relation between the productivity and the degree of development of the fractures in low porosity and low permeability sandstone and shale reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2003, 23(5): 41-44]
- 丁文龙, 张博闻, 李泰明. 古龙凹陷泥岩非构造裂缝的形成[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 50-54 [Ding Wenlong, Zhang Bowen, Li Taiming. Formation of non-tectonic fractures in mudstones in Gulong depression [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(1): 50-54]
- 杨涛. 泥岩超压释放深度和次数及其主要影响因素[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(04): 1-4 [Yang Tao. Release depth and times of overpressure of mudstone and its influential factors [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(04): 1-4]
- 徐福刚, 李琦, 康仁华, 等. 沾化凹陷泥岩裂缝油气藏研究[J]. 矿物岩石, 2003, 23(1): 74-76 [Xu Fugang, Li Qi, Kang Renhua, et al. The characteristics of fractured shale reservoir of in Zhanhua depression [J]. Mineral Petrology, 2003, 23(1): 74-76]
- 郭璇, 钟建华, 徐小林, 等. 非构造裂缝的发育特征及成因机制[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2004, 28(2): 6-11 [Guo Xuan, Zhong Jianhua, Xu Xiaolin, et al. Development characteristics and genetic mechanism of the untectonic fracture [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2004, 28(2): 6-11]
- 赵澄林. 沉积学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001 [Zhao Chenglin. Sedimentological Theory [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001]
- 姜在兴. 沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003 [Jiang Zaixing. Sedimentology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003]
- Plummer P S, Gostin V A. Shrinkage cracks: Desiccation or syneresis [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1981, 51(4): 1147-1156
- 赵振宇, 周瑶琪, 马晓鸣. 泥岩非构造裂缝与现代水下收缩裂缝相似性研究[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2008, 23(3): 6-11 [Zhao Zhenyu, Zhou Yaoqi, Ma Xiaoming. Study on the similarity of the non-tectonic cracks in mud-shale to underwater shrinkage cracks in present muddy sediments [J]. Journal of Xi'an Shiyu University: Natural Science Edition, 2008, 23(3): 6-11]
- 周瑶琪, 赵振宇, 马晓鸣, 等. 水下收缩裂隙沉积模式及定量化研究[J]. 沉积学报, 2006, 24(5): 672-679 [Zhou Yaoqi, Zhao Zhenyu, Ma Xiaoming, et al. The sedimentary model and quantitative analysis of the subaqueous shrink-cracks [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(5): 672-679]
- 赵振宇, 周瑶琪, 马晓鸣, 等. 水下收缩裂隙天然实验研究中获得的新认识[J]. 地质论评, 2007, 53(3): 306-318 [Zhao Zhenyu, Zhou Yaoqi, Ma Xiaoming, et al. Some discoveries on researching subaqueous mud-shrinkage cracks in present muddy sediments [J]. Geological Review, 2007, 53(3): 306-318]
- 吴泰然, 何国琦, 韩宝福. 一种罕见的泥裂现象[J]. 科学通报, 1998, 43(17): 1903-1904 [Wu Tairan, He Guoqi, Han Baofu. A peculiar phenomenon of cracks [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(17): 1903-1904]
- Chertkov V Y, Ravina I. Morphology of horizontal cracks in swelling soils. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 1999, 31: 19-29
- Hallet P D, Dexter A R, Seville J P K. Identification of preexisting cracks on soil fracture surfaces using dye [J]. Soil & Tillage Research, 1995, 33: 163-184
- Velde B. Structure of surface cracks in soil and muds [J]. Geoderma, 1999, 93: 101-124
- Jeffrey S K, Joseph F S J, Charles P S. Mud cracks and dedolomitization in the Wittenoom Dolomite, Hamersley Group, Western Australia [J]. Global and Planetary Change, 1996, 14: 73-96
- Karmakar S, Kushwaha R L, Stilling D S D. Soil failure associated with crack propagation for an agricultural tillage tool [J]. Soil & Tillage Research, 2005, 84: 119-126
- Parker P Anthony. Stability of arrays of multiple edge cracks [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1999, 62: 577-591
- Brian R Pratt. Syneresis cracks: subaqueous shrinkage in argillaceous sediments caused by earthquake-induced dewatering [J]. Sedimentary Geology, 1998, 117: 1-10
- Ringrose-Voase A J, Sanidad W H. A method for measuring the development of surface cracks in soils: application to crack development after lowland rice [J]. AAPG Bulletin, 1996, 71: 245-261
- Vogel H J, Hoffmann H, Roth K. Studies of crack dynamics in clay soil I. Experimental methods, results, and morphological quantification [J]. Geoderma, 2005, 125: 203-211
- 张晓龙, 李培英. 现代黄河三角洲的海岸侵蚀及其环境影响[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(5): 475-479 [Zhang Xiaolong, Li Peiying. Coastal erosion and its environmental effect in the Modern Yellow River Delta [J]. Marine Environmental Science, 2008, 27(5): 475-479]
- Carl N Drummond, Damon N Sexton 著 杨明慧, 田雨东译. 缝合线的分形结构[J]. 世界地质, 1999, 18(3): 29-31 [Carl N Drummond, Damon N Sexton ed. Yang Minghui, Tian Yudong Translated. Fractal texture of suture [J]. World Geology, 1999, 18(3): 29-31]

- 26 易顺民. 膨胀土裂隙结构的分形特征及其意义[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(3): 294-298 [Yi Shunmin. The fractal characteristics of fractures in expansion soil and its significance [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(3): 294-298]
- 27 李玮, 闫铁, 毕雪亮. 基于分形方法的水力压裂裂缝起裂扩展机理[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(5): 87-91 [Li Wei, Yan Tie, Bi Xueliang. Mechanism of hydraulically created fracture breakdown and propagation based on fractal method [J]. Journal of China University of Petroleum, 2008, 32(5): 87-91]
- 28 王自明, 宋文杰, 戴勇, 等. 利用分形模拟建立裂缝型碳酸盐岩储层渗透率变异函数[J]. 天然气工业, 2007, 27(11): 73-77 [Wang Ziming, Song Wenjie, Dai Yong, et al. Application of fractal simulation technique to modeling of fractured carbonate reservoir [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(11): 73-77]
- 29 Horgan G W, Young I M. An empirical stochastic model for the geometry of two dimensional crack growth in soil [J]. Geodema, 2000, 96: 263-276

Spatial Distribution Research on Contemporary Non-tectonic Cracks in Mud Sediment at Yellow River Delta

CHENG Wei¹ ZHOU Yao-qi¹ YAN Hua²

(1. Laboratory of Geochemistry & Lithosphere Dynamics, China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061;

2. The Geoscience Research Institute of Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257061)

Abstract This paper studied contemporary non-tectonic cracks in mud sediment of delta plain at Yellow River Delta. Subaqueous shrinkage cracks, desiccation cracks and mixed origin cracks are studied in detail at the aspects of quantitative classification, fractal features, planar and sectional growth pattern and development models. This paper has established the quantitative characterization and comparison standards of different non-tectonic cracks in modern mud sediment.

1. Description of crack types

Non-tectonic cracks at Yellow River Delta can be divided into three types: Subaqueous shrinkage cracks, desiccation cracks and mixed origin cracks

Characteristics of subaqueous shrinkage cracks are: deep overlying water body; most with just one grade of cracks; smooth crack walls; large base crack unit area; cracks are more developed in sectors of shallow water than those in deep water in a long and narrow water body.

Characteristics of desiccation cracks are: usually multiple crack grades; V-shaped in vertical section; upward curling of crack unit margins due to desiccation.

Characteristics of mixed origin cracks are: the first type observed has secondary crack grades developed on the basis of previous subaqueous shrinkage crack due to subaerial exposure; the second type observed has two independent crack systems desiccation cracks overlying filled subaqueous shrinkage cracks.

The occurrence of many different crack types in this study area without significant microfacies changes can be attributed to the various volume and depth of overlying water body: for areas with deepest water and largest volume, subaqueous shrinkage cracks easily form because of more mud containing water; for areas with least water depth, only desiccation cracks develop; and for areas with water parameters between those of the first two, different kinds of mixed origin cracks develop highly possibly.

2. Statistical analyses of cracks

Quantitative classification of first-grade crack unit area is applied to all study areas under the same criteria. The distribution of areas of subaqueous shrinkage cracks is the most centralized, which are mostly more than 500cm²; desiccation cracks unit areas have the largest area span; while the mixed origin cracks fall in between the first two, lacking areas of small figures.

Fractal dimensions are calculated for each crack area by the overlapping method. It is found that the fractal di-

mension rises from subaqueous shrinkage cracks to desiccation. Fractal theory can be well applied to analyze the planar density, complexity and connectivity of cracks, thus a good method in characterizing level of crack development.

3. Analyses of crack growth patterns

Similar planar growth patterns of all kinds of cracks are observed: New cracks develop at inflection points on the side of convex curvature. The intersection angle of new crack to host crack is greater than 70° , while the angle of bending crack to its original direction is less than 70° . A theory of shrinkage circle is adopted to demonstrate crack growth pattern. In vertical section, shrinkage sphere is used to illustrate the structure of bottom-up subaqueous shrinkage cracks which are similar to the "flower structure" used to describe faults, whereas there is a distinct difference from the V-shaped top-down desiccation cracks.

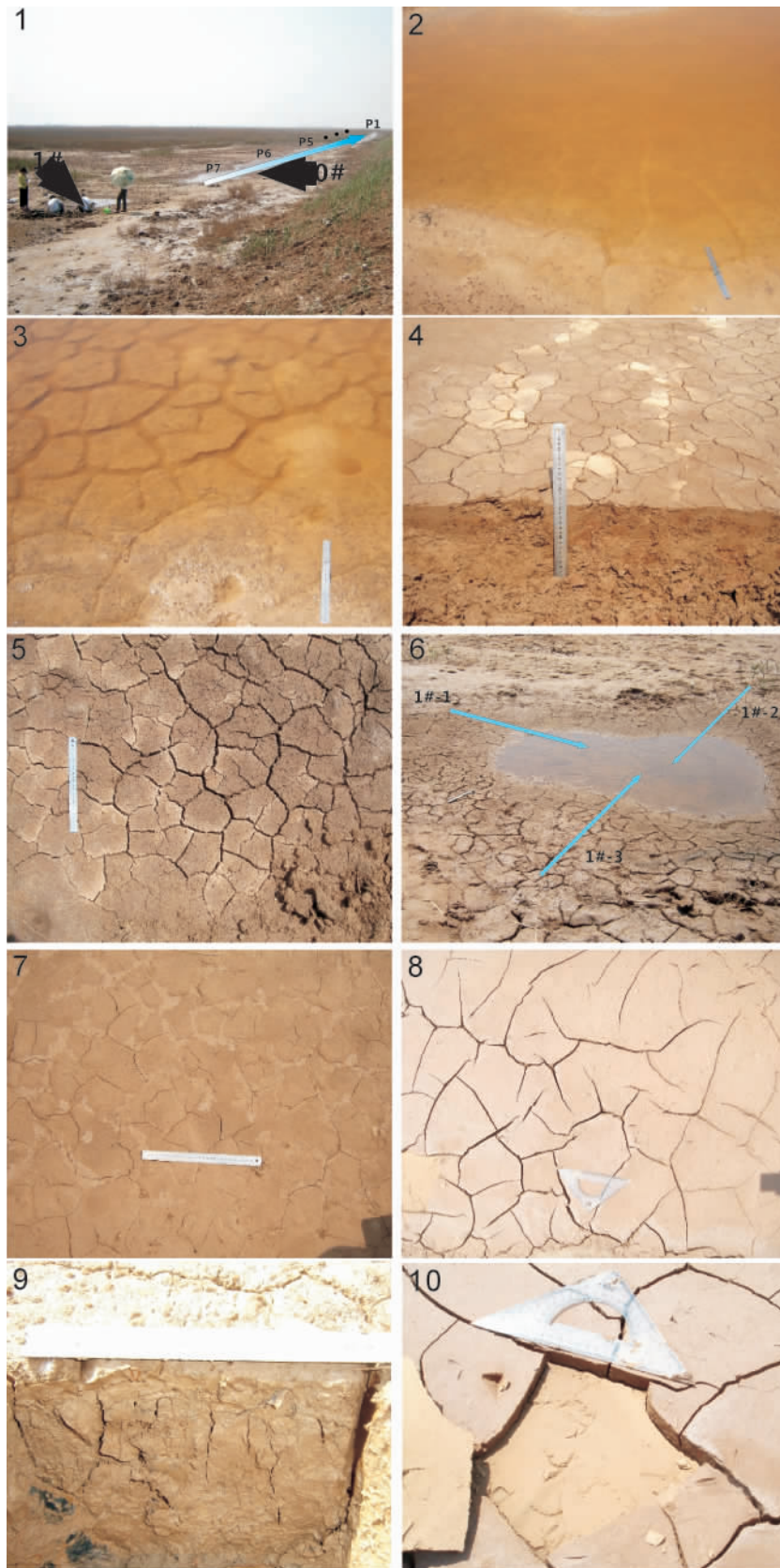
4. Development models

Development models are established respectively for all types of cracks, in which relationships of mutual transformation of certain crack types are shown. Generally, from deep to shallow areas, subaqueous shrinkage cracks, mixed origin cracks and desiccation cracks develop in succession, and some of them can transform if affected by weather. It is possible that more types of mixed origin cracks appear under more complicated conditions.

5. Discussion

Although there seem to be numerous studies on spatial distribution of non-tectonic mud shrinkage cracks, convincing theories of factors affecting crack development is still yet to be discovered. It is recommended more studies of crack simulation experiment on certain crack development factor(s) to be done in order to gain a better understanding of non-tectonic shrinkage cracks.

Key words non-tectonic cracks; mud sediment; Yellow River Delta; contemporary; quantitative; growth pattern and development model



图版 I 说明: 1. 0#和1#工区位置及0#工区观测点示意图; 2. 0#工区 P3 观测点裂缝照片; 3. 0#工区 P5 观测点裂缝照片; 4. 2#工区裂缝平面及剖面照片; 5. 4#工区裂缝平面照片; 6. 1#工区裂缝照片及测线位置示意图; 7. 3#工区裂缝平面照片; 8. 裂缝平面开裂角度及生长角度照片; 9. 水下收缩裂缝生长剖面照片; 10. 干裂生长剖面照片