

文章编号: 1000-0550(2006)05-0672-09

水下收缩裂隙沉积模式及定量化研究^①

周瑶琪^{1,2} 赵振宇^{1,2} 马晓鸣² 冀国盛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 257064; 2 中国石油大学地球资源与信息学院 山东东营 257061)

摘要 通过野外实地考察测试、室内实验分析、数据处理等,对水下收缩裂隙的形成过程、裂缝充填模式、定量分级、各参数之间的拟合关系、微小扰动对裂缝形成的影响等进行了详细讨论,并且建立了水下收缩裂隙产生的地质理论模型以及对未来研究方向提出的几点建议。这些对于定量描述裂缝形态、结构、变化规律,预测区域性裂缝规模、分布范围,判别区域沉积环境具有十分重要的理论意义和现实意义。

关键词 水下收缩裂隙 地质模型 定量描述 微小扰动 展望

第一作者简介 周瑶琪 男 1963 年出生 教授 博士生导师 地球动力学、地球化学以及盆地沉积学

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

水下收缩裂隙与泥裂是两种不同的沉积构造,前者是泥质层在水下脱水收缩或者含盐度增大而造成的;后者则是由于沉积层表面间歇性出露水面经历暴晒的良好标志^[1-5]。长期以来,人们对于水下收缩裂隙或者泥裂的研究多停留在定性的描述上,缺乏深入的定量化研究,即便是在一些重要的沉积学著作中也未涉及^[6-13]。

本文以青岛市唐岛湾沿岸七个水塘为实验基地,观察了水下收缩裂隙的形成过程、裂缝开裂规律以及裂缝充填模式的演变等,特别是对裂缝各参数之间的拟合分析,对于定量描述裂缝形态结构、变化规律,预测区域性裂缝规模、分布范围,判别区域沉积环境具有十分重要的理论意义和现实意义^[16-21]。

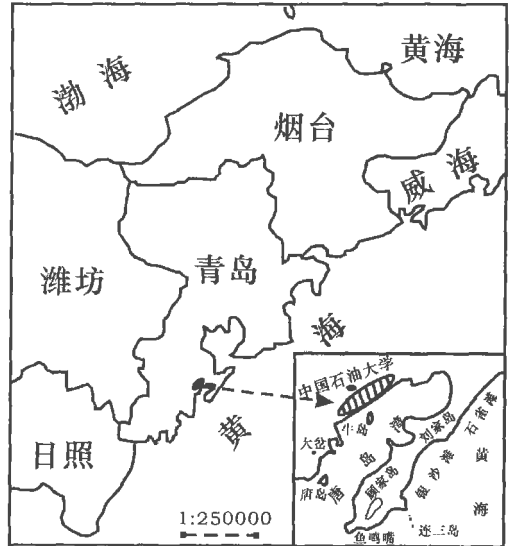


图 1 区域位置图 (1:25万)

Fig 1 The territorial location

表 1 裂隙研究区域参数调查表

Table 1 The questionnaire of some parameters in the crack studying area

参数	基地号	1	2	3	4	5	6	7
水盐度 /‰		3.57	3.57	3.54	3.54	3.75	3.64	3.62
砂粒级		粉砂	粉砂	粗粉砂	细砂	粉砂	细砂	细砂
含砂量 /%		10	15	12.5	20	20	25	15
裂缝发育度		差	中	中	好	好	好	差
裂缝分维值 D		1.235	1.413	1.334	1.507	1.498	1.475	1.227
生物干扰		中	强	弱	中	中	中	强

1 研究区地质概况

唐岛湾位于青岛市黄岛经济技术开发区东南部,沿岸以障壁海岸相沉积为主,波浪作用微弱,很难形成高能环境,因此在平坦的坪地上形成了宽广的潮坪沉积和泻湖沉积,如图 1。沉积构造类型多样,潮坪生物群以种类少而数量多、海相和陆相混生为特征,半咸水或广盐度生物大量发育,分异度低。研究区域在未注入泥水混合物(海水+淤泥)之前,为人工水塘,塘底平坦,边坡平缓。待泥水混合物充分沉淀后,主要以淤泥为主,含少量细粉砂,具体参数指标见表 1。

① 国家自然科学基金项目(批准号:40072042)资助。

收稿日期:2005-12-22 收修改稿日期:2006-03-02

2 水下收缩裂隙特征

2.1 水下收缩裂隙特征描述

研究区水下收缩裂隙主要有矩形收缩裂隙和网状收缩裂隙两种形式, 二者相对数量比约为 5 : 1, 因此矩形裂隙的研究应占主导地位。

矩形收缩裂隙由三部分组成: 两条分别相互平行的纵向裂隙、横向裂隙以及二者共同围成的裂隙基块, 如图 2 图版 I-1、2。其平面结构, 类似于矩形, 长边多为纵向裂隙, 与岸边垂直, 短边多为横向裂隙, 与水边平行, 矩形的面积相当于裂隙基块。由于沉积区斜坡倾角效应, 因此矩形裂隙区收缩裂隙形态 85% 为矩形, 其余为三角形、五边形等。节点多为两边或者三边交叉而成。据统计, 两边节点约为 87%, 三边节点约为 10%, 其余多边节点约占 3%。在相同级别裂隙中, 纵向裂隙最长可达 15 m, 一般 2~6 m 左右, 而横向裂隙最长可达 12 m, 一般 1~5 m 左右。纵向裂隙最宽约为 6~7 cm, 一般集中在 2~4 cm 左右, 而横向裂隙最宽可达 4~5 cm, 一般集中在 1~4 cm 左右。两者裂隙倾角基本为 90°, 都呈“V”型, 裂隙面吸附物质多为灰色、灰白色淤泥颗粒, 有机质含量高, 因此较为光滑。



图 2 矩形裂隙平面结构图

Fig 2 The planar configuration of rectangular cracks

网状收缩裂隙则由两部分组成: 网状裂隙和裂隙基块, 如图版 I-3。其平面结构, 类似于网状, 无长短边之分。据统计, 网状裂隙形态 65% 为五边形, 25% 为六边形, 其余为三角形、四边形、近圆形等。节点多为三边或四边交叉而成, 三边节点约为 90%, 两边和

四边节点约为 10%。由于自然界中相对平坦区域很少, 因此在网状收缩裂隙区内, 也会存在大量的矩形裂隙, 相反亦然。网状裂隙边长较为平均, 最长可达 3 m, 一般集中在 1~2 m, 裂隙宽度最宽可达 4~5 cm, 一般集中在 1~3 cm 左右。裂隙倾角较大, 约 90°, 裂隙面较为光滑, 充填物粒度由下至上明显变细。

2.2 水下收缩裂隙定量分级

水下收缩裂隙定量分级, 可以用多个参数来衡量, 共分四级, 如表 2 具体如下: 纵向裂缝长分级: 一级: 大于 90 cm; 二级: 50~90 cm; 三级: 20~50 cm; 四级: 小于 20 cm。横向裂缝长分级: 一级: 大于 60 cm; 二级: 40~60 cm; 三级: 20~40 cm; 四级: 小于 20 cm。裂缝面积分级: 一级: 大于 1000 cm²; 二级: 500~1000 cm²; 三级: 50~500 cm²; 四级: 小于 50 cm²。基块面积分级: 一级: 大于 8000 cm²; 二级: 1000~8000 cm²; 三级: 500~1000 cm²; 四级: 小于 500 cm²。

研究中发现, 裂缝形成初期往往发育高级裂缝, 随着含水量下降, 含盐度的上升, 在先期形成的高级裂缝基块之上又逐渐发育了次级裂缝。开裂方式有三种: 第一, 单边断开开裂式——首先从基块某一长边中间开始垂直断裂, 然后是相邻短边, 裂缝走向垂直长边(或平行短边)一直延伸到另一边; 第二, 双边会合开裂式——由基块相互平行的两边同时开裂, 至中间部位会合; 第三, 中心放射开裂式——首先基块中心略微隆起, 然后由中心向长短边同时开裂。整体观察裂隙开裂后形态, 类似“田”构型, 因此每个大的裂隙基块又可形成 4 个次一级矩形收缩裂隙, 依次循环, 直至最低级裂隙。

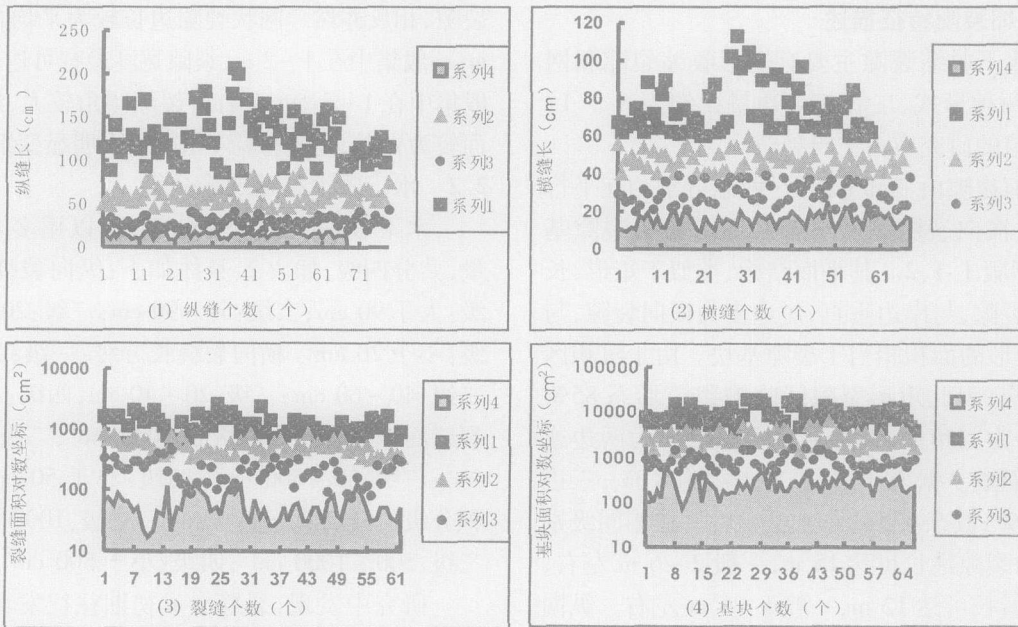
最高级裂隙所包含的次级基块数量可用公式 $Y = 2^{(X-1)}$ (Y : 裂隙基块数量; X : 裂隙级别, 通常 $1 \leq X \leq 4$) 表示。由此可见, 裂隙发育到最后阶段, 会呈现多级裂缝混合存在的状况, 如能正确区分各级别裂缝的分布状况, 对于区域地质研究, 特别是泥岩原生裂缝储集层油气开采具有重要的指导意义。

2.3 水下收缩裂缝充填模式

水下收缩裂隙形成期间, 由于沉积物中泥沙含量以及沉积环境不同, 又可分为四种裂缝充填模式来研究。如图 3-1, 在泥质地层静水条件下, 由裂缝壁至裂缝中心, 沉积充填物粒度从隙壁的含砂泥到中心处的有机泥, 逐渐变细。后期水量减少, 外来物质搬运再沉积, 随之进入裂缝, 由裂缝壁至裂缝中心, 沉积物的粒度经历了粗—细—粗的转变。

表 2 裂缝各参数分级情况表

Table 2 The quantitative orders of some cracks divided by parameters



(1) 纵缝长分级 (2) 横缝长分级 (3) 裂缝面积分级 裂缝面积 = $(L_x \times L_x + S_x \times S_y)$ (4) 基块面积分级 基块面积 = $(S_x - 2L_x) \times (L_y - 2S_y) / L_x$, L_x , S_x , S_y 代表意义如图 2 单位均为 cm 图中系列后数字代表裂隙级别

含砂泥质地层静水条件与泥质地层静水条件充填模式略有不同, 如图 3-2, 裂缝壁附近沉积物为粉砂泥—粉砂互层, 到中心处, 转化为有机质泥。后期水量减少, 在有机泥的中心处又添入了外来的砂以及粗碎屑, 整体充填物粒度序列呈现出粗—细—粗的变化趋势。

图版 I-4 为裂缝纵剖面分层结构图, 整个纵剖面分为三层: 第一层为裂隙层; 第二层为生物发育层 (图版 I-5); 第三层为非饱和含水层。顾名思义, 裂

隙层主要是指现阶段裂隙所能延伸到的部位, 随着含水量的下降, 裂隙逐渐向下延伸, 该层位的纵向深度也便随之加深。非饱和含水层为裂缝形成的后备基地。生物发育层在前人的研究中从未报道过^[22~24], 从图中可以看出, 该层位发育了大量植物根系, 这些根系的存在, 对于有效阻止裂缝后期闭合, 改变裂隙充填物的物理、化学性质, 改善裂缝渗透率及水动力机制具有重要的意义。各层位的相对高度与泥土中蒙脱石、高岭石含量息息相关^[25~27]。

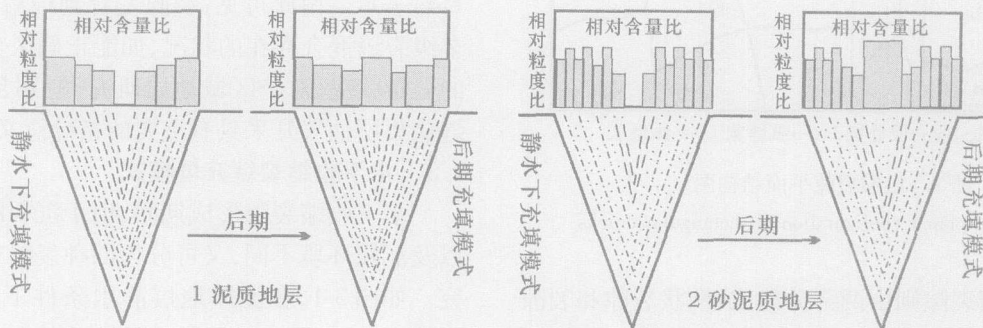


图 3 裂缝充填模式

Fig 3 The filling model of cracks

3 水下收缩裂隙成因机制分析

3.1 水下收缩裂隙形成过程分析

水下收缩裂隙整体形成过程大致经历了五个阶段(如图 4): (1): 泥水混合物进入低洼地带的初始混浊状态。在经历了巨大的扰动之后, 沉积物很难在短时间内沉积压实, 较细的物质悬浮水中, 一些大的介壳和粗的内碎屑、砂石则首先沉积在底部, 形成了初步的沉积分选。(2): 沉积稳定阶段。沉积物按粒度大小依次沉积, 形成向上逐渐变细的粒序层, 压实作用增强, 水位线基本不变, 但相对可容空间增大。(3): 水位线下降, 盐度增大, 裂隙形成阶段。此时水深变浅, 一般小于 40~50 cm, 风的强度、温度、日照量、降雨量变化都会对裂隙的形态及规模产生重要影响。

平坦区域, 形成网状收缩裂缝, 边坡区域形成矩形收缩裂缝。两种裂缝内充填物均以有机质和淤泥为主, 此时水沿着裂缝壁渗出。(4): 沉积裂隙二次充填阶段。随着水位的逐渐下降, 裂缝的宽度和深度也随之逐渐增大。裂缝进入二次充填阶段后, 充填物有两种来源方式, 分别为外来物质和本身的斜坡物质, 此时水冲破基块涌出。(5): 水体再次进入裂缝形成区域。如为淡水注入, 裂缝会暂时略微闭合, 后期恢复到原来的状态或者更大。如为咸水注入, 初期裂缝也会暂时闭合, 由于盐度效应, 其闭合程度会略低于淡水, 但后期裂缝开裂程度要比原来进一步加大。如为泥水混合物, 则继续重复上面的四个过程, 裂缝的大小则与泥和水的盐度相对应, 具体定量关系我们将另文详述。

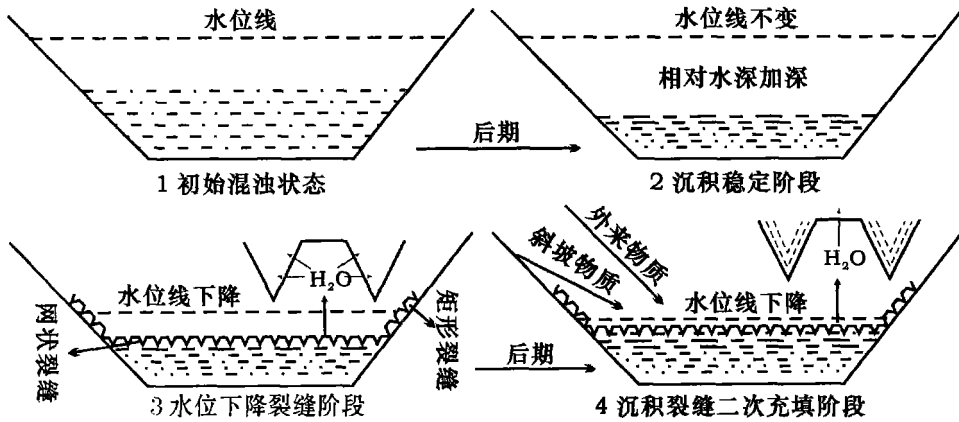


图 4 水下收缩裂隙整体沉积模式阶段图

Fig 4 The sedimentary model of the rectangular shrinking cracks

3.2 水下收缩裂隙地质建模

如图 5-1 所示, 沿 Y 轴方向含水量逐渐降低, 沉积泥纵向内聚力 F_y 逐渐增大; 沿 X 轴等水量线方向, 沉积泥横向内聚力 F_x 近于平衡, 但纵向上也呈逐渐降低的趋势。沿纵向裂隙 (Y 轴方向) 切一道垂直纵剖面, 质点相对位移如图 5-2 由左至右, 质点位移逐渐增大, 由上至下, 质点位移逐渐减少。此时 X 轴方向合力 F_{xx} 等于 F_x , Y 轴方向 F_{yy} 应该是质点重力沿斜坡方向的分量与脱水收缩力的合力, 同一质点, 可用下面的公式表示。关于裂隙产生过程中内聚力矢量分析见图 5-3 曲线 A 代表开裂段力的变化趋势, 曲线 B 代表未开裂段力的变化趋势, 两者接点处 (裂缝尖部) 受力最大, 如果沉积物质均匀, 曲线 B 的曲率应略大于曲线 A。

$$F_{yy} = F_y - M G \sin\Phi$$

(F_{yy} : Y 轴方向合力; F_y : 纵向内聚力; M : 质点质量; G : 引力常数; Φ : 斜坡倾角)

$$F_x = F_y (F_x: \text{纵向内聚力}; F_y: \text{纵向内聚力})$$

在矩形收缩裂隙区, 随处可见纵向裂隙先于横向裂隙开裂的现象, 经过地质力学分析, 我们得出如下解释: 假设沉积泥开裂时的临界内聚力为 F_0 , 由于斜坡效应, 使得 $F_{xx} \geq F_{yy}$ 斜坡倾角越大, 两者相差越悬殊, 因此首先达到 F_0 值应该为 F_{xx} , 从而纵向裂隙也便优先产生了。

从图 2 可知, 横向裂隙产生的错断较多, 这与构造剪切裂隙的成因理念完全不同。在构造裂隙中, 被切断的裂隙为先期裂隙 (节理), 而此处的横向泥裂隙却为后期裂隙, 如不能正确判断裂缝的成因, 往往会做出错误结论。在网状收缩裂隙区, 倾角为零, 合

$$F_{xx} = F_x (F_{xx}: \text{X 轴方向合力}; F_x: \text{纵向内聚力})$$

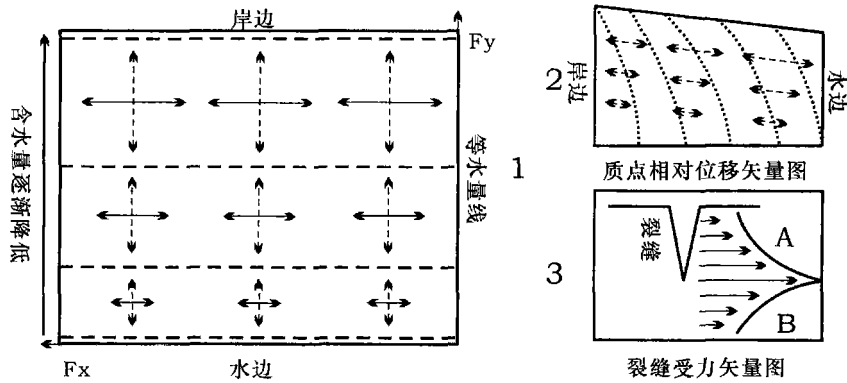


图 5 矩形收缩裂隙形成地质模型

Fig 5 The geo model of the rectangular shrinking cracks

力 $F_x = F_y$, 内聚力等势线近同心圆状, 因此裂隙产生后, 外部轮廓类似于网状, 从而得名网状收缩裂隙。

3.3 水下裂隙各参数拟合分析

本文通过定量模拟、曲线拟合等多重手段, 得到了一些重要的经验公式, 如表 3。其中表 3-1~8 为裂隙本身内部各参数之间的曲线变化关系, 对于全面了解水下裂隙形态、结构、变化规律, 预测区域性裂缝规模、分布范围具有重要意义。表 3-9 利用现代数值分形理论, 讨论了裂隙平面分维值 D 与沉积泥含砂量之间的拟合关系, 并得出拟合公式, 这对于预测同类地区裂缝分布状况有重要帮助。

表 3-10 利用数值理论分析, 能在众多数据中有效的区分各工区的裂缝参数, 斜线 L 之上区域, 代表裂缝发育较好地区, 离斜线越远, 相对越好; 斜线 L 之下, 代表裂缝发育较差地区, 离斜线越远, 相对越差。同时对于区域沉积环境也有较好的指示作用, 斜线 L 之上区域, 代表粘土含量高, 盐度偏大, 泥水注入时能量高, 裂隙形成沉积时期水体稳定。斜线 L 之下, 正好相反。如地层中出现原生泥岩裂缝, 代表该区域在相当长的时间里, 处于稳定的海陆过渡相或者内陆咸水湖相的接受沉积区。

4 微小扰动对裂缝形成的影响

当粘土内聚力将要达到裂缝开裂的临界值时, 生物爬行迹、觅食迹、钻孔, 冰晶冻结形成的梅花印, 相对低洼处的水流痕, 都是裂缝开裂的首选路径。如图版 I-6 7 8 由此我们得出, 泥裂形成时只要在临界状态下给予很小的扰动, 裂隙就可以按一定的规律分布。从而我们也可以得到一点初步的认识, 那就是岩石在形成裂隙的临界状态下, 如果受到一定规律的扰

动, 裂隙的分布特征同样会受到扰动因素的控制。张文佑早已发现地壳中分布了许多锯齿状的断裂体系^[28], 李四光在研究全球构造体系时也早已指出, 这种空间组合规律似乎与地球自转轴的方位有一定的关系^[29]。但据研究, 地球自转速率在变化所产生的应力过于微小, 以致多数学者认为它没有构造意义^[30~32]。图版 I-6 7 8 所显示的现象给我们以提示, 地球自转所产生的微小扰动是否也可以造成优势方位的裂隙或构造形迹的形成, 这对解决长期困扰我们的问题是否有一定的意义呢?

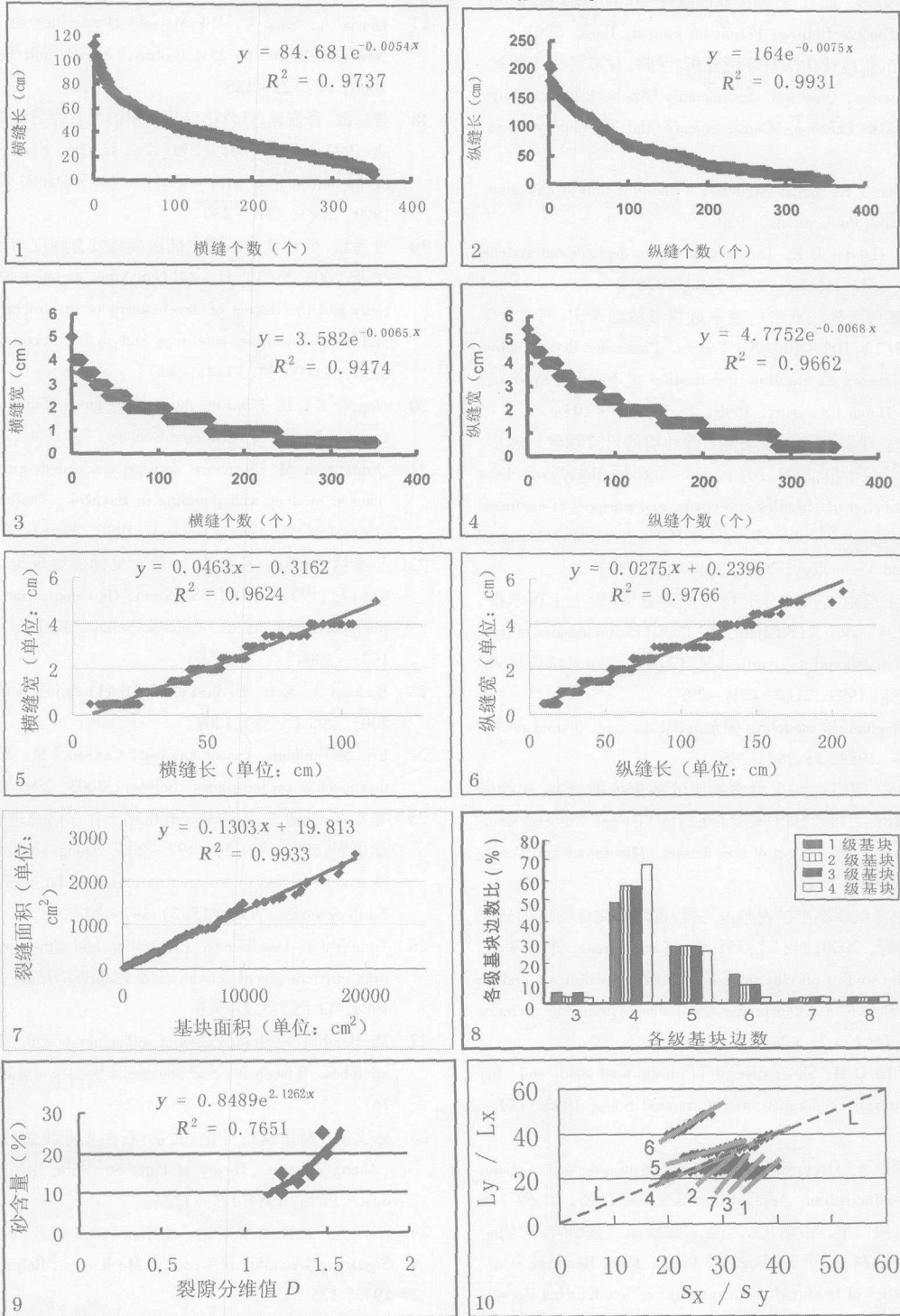
5 未来研究方向展望

从目前研究现状来看, 水下收缩裂隙(或者泥裂)的研究大多停留在定性的描述中, 缺乏定量分析, 要全面认识和把握水下裂隙性质的一般规律, 必须从沉积土层的内在因素着手, 结合外在影响因素, 综合考虑问题^[33]。笔者认为应加强以下几个方面的研究: (1) 加强沉积土矿物成分、化学成分与裂隙分布规律的研究, 结合分形理论、古沉积环境、地应力、重力作用与胀缩应力, 建立区域性裂隙分布空间三维模型, 为地质工程、地矿、油气开采等工业服务。(2) 加强关于非饱和土理论中荷载—含水量—吸力关系的研究, 通过现场试验发展新的应用性数值分析理论和方法, 从而真正揭示沉积粘土的强度和变形特性, 建立多参数实用性模拟公式。(3) 加强裂隙内充填物性质研究, 特别是充填物厚度、结构面形态特征、光滑度、水动力作用等对后期成岩作用的影响, 对于有效区分原生裂缝与构造裂缝具有十分重要的作用。(4) 加强研究裂缝—基质双重孔隙系统内水—充填物—油气性质的变化和分布规律, 为勘探开发裂缝储

层和油气提供依据。(5) 加强裂缝充填物的处理技术, 尤其是化学改良方法的研究。

表 3 各参数之间的关系

Table 3 The relationship among some parameters



(1) 各级横缝长总体变化趋势 (2) 各级纵缝长总体变化趋势 (3) 各级横缝宽总体变化趋势 (4) 各级纵缝宽总体变化趋势 (5) 横缝长与横缝宽变化趋势 (6) 纵缝长与纵缝宽变化趋势 (7) 块体面积与裂缝面积变化趋势 (8) 各级别裂隙边数百分比 (9) 含砂量与裂隙平面分维值 D 变化趋势 (10) $L_y / L_x - S_x / S_y$ 工区来源反映图所有单项数据均经过排序, 这对于区域性研究有重要意义

参考文献 (References)

- 1 冯增昭, 王英华. 中国沉积学. 北京: 石油工业出版社, 1990 [Feng Zengzhao Wang Yinghua Sedimentology in China Beijing Petroleum Industry Press 1990]
- 2 赵澄林. 沉积学原理. 北京: 石油工业出版社, 2001 [Zhao Chenglin Sedimentologic Theory Beijing Petroleum Industry Press 2001]
- 3 邓宏文, 钱凯. 沉积地球化学与环境分析. 兰州: 甘肃科学出版社, 1993 [Deng Hongwen Qian Kai Sedimentary Geochemistry and Environmental Analysis Lanzhou Gansu Science and Technology Press 1993]
- 4 Allen P A, Allen J R. Basin Analysis Principles and Application Blackwell Scientific Publications 1990
- 5 Galloway W W, Hobday D K. Terrigenous clastic depositional systems Springer Verlag Berlin Heidelberg New York 1996
- 6 徐永福. 宁夏膨胀土膨胀变形的速率过程参数的确定. 河海大学学报, 1999 25(7): 100 ~ 103 [Xu Yongfu Parameter determination by rate process theory for swelling deformation of Ningxia expansive soil Journal of Hohai University 1999 25(7): 100 ~ 103]
- 7 贾东亮, 丁述理, 杜海金, 等. 膨胀土工程性质的研究现状与展望. 河北建筑科技学院学报, 2003 20(1): 33 ~ 39 [Jia Dongliang Ding Shuli Du Haijin et al Studies on existing and prospect of engineering properties of expansive clay Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology 2003 20(1): 33 ~ 39]
- 8 易顺民. 膨胀土裂隙结构的分形特征及其意义. 岩土工程学报, 1999 21(3): 294 ~ 298 [Yi Shunmin The fractal characteristics of fractures in expansion soil and its significance Chinese Journal of Geotechnical Engineering 1999 21(3): 294 ~ 298]
- 9 Murakami S. Mechanical modeling of material damage. Journal of Applied Mechanics 1988 55: 280 ~ 286
- 10 马洪生, 胡卸文. 裂隙性粘土力学效应的数值模拟研究. 矿物岩石, 1998 18: 182 ~ 184 [Ma Hongsheng Hu Xiewen Numerical simulation research on fissure effect of clay masses Mineralogy and Petrology 1998 18: 182 ~ 184]
- 11 陈忠, 颜文. 海洋沉积粘土矿物与古气候、古环境演化响应的研究进展. 科学视野, 2000 24(2): 25 ~ 27 [Chen Zhong Yan Wen Advances of the studies on clay minerals in marine sediments and its response to evolution of paleoclimate and paleoenvironment Science Scope 2000 24(2): 25 ~ 27]
- 12 Rohm S A, Vilar O M. Shear strength of unsaturated sandy soil. In: The 1st International Conference on Unsaturated Soils 1995. 189 ~ 195
- 13 Ramezani A Mahjoory. Occurrence and mineralogy of a deposit of shampo-clay in southern Iran. Applied Clay Science 1996 10: 69 ~ 76
- 14 徐福刚, 李琦, 康仁华, 等. 沾化凹陷泥岩裂缝油气藏研究. 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 Mineral Petrology 2003 23(1): 74 ~ 76]
- 15 张金功, 王定一. 异常超压带内开启泥岩裂隙的分布与油气初次运移. 石油与天然气地质, 1996 17(1): 27 ~ 31 [Zhang Jingong Wang Dingyi Distribution of open fractures in abnormal overpressure mudstone and primary migration of hydrocarbon Oil & Gas Geology 1996 17(1): 27 ~ 31]
- 16 丁文龙, 张博闻, 李泰明. 古龙凹陷泥岩非构造裂缝的形成. 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 Oil & Gas Geology 2003 24(1): 50 ~ 54]
- 17 Dornik A, Stow V, Mikkayall. Deepwater sedimentary systems. New models for the 21st century. Marine and Petroleum Geology 2000 17: 125 ~ 135
- 18 曾联波, 肖淑蓉. 低渗透储集层中的泥岩裂缝储集体. 石油实验地质, 1999 21(3): 267 ~ 230 [Zeng Lianbo Xiao Shurong Fractures in the mudstone of tight reservoirs Experimental Petroleum Geology 1999 21(3): 267 ~ 230]
- 19 甘秀娥. 低孔低渗砂泥岩储层裂缝发育程度与产能关系. 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 Natural Gas Industry 2003 23(5): 41 ~ 44]
- 20 Hopper E C D. Fluid migration along growth faults in compacting sediments. Journal of Petroleum Geology 1991 4(2): 161 ~ 180
- 21 Eddleston M. Structure damage associated with land subsidence caused by deep well pumping in Bangkok Thailand. The Quarterly Journal of Engineering Geology 1996 29(1): 267 ~ 230
- 22 吴泰然, 何国琦, 韩宝福. 一种罕见的泥裂现象. 科学通报, 1998 43(17): 1903 ~ 1904 [Wu Tairan He Guoqi Han Baofu A peculiar phenomenon of cracks Chinese Science Bulletin 1998 43(17): 1903 ~ 1904]
- 23 Richard A. Kern. Earliest animal tracks or just mud cracks? Science 2002 295(5558): 1209
- 24 Eric M Dunham, Pascal Favreau, Carlson J M. A supershear transition mechanism for cracks. Science 2003 299(5612): 1557 ~ 1559
- 25 邓友军, 马毅杰, 温淑瑶. 有机粘土化学研究进展与展望. 地球科学进展, 2003 15(2): 197 ~ 203 [Deng Youjun Ma Yijie Wen Shuyao Progress in research on organo-clay chemistry. Advance in Earth Sciences 2003 15(2): 197 ~ 203]
- 26 Tunney J J, Detellier C. Preparation and characterization of two distinct ethylene glycol derivatives of kaolinite. Clays and Clay Minerals 1994 42(5): 552 ~ 560
- 27 Mortland M M. Interactions of soil minerals with natural organics and microbes. Wisconsin Soil Science of Society of America 1986 59 ~ 761
- 28 张文佑. 断块构造导论. 北京: 石油工业出版社, 1984 111 ~ 122 [Zhang Wenyou Theory of Parts Structure Beijing Petroleum Industry Press 1984. 111 ~ 122]
- 29 李四光. 地质力学概论. 北京: 科学出版社, 1973. 125 ~ 131 [Li Siguang Generality of Geologic Mechanics Beijing Science Press 1973. 125 ~ 131]
- 30 李致森. 地球动力学进展. 北京: 海洋出版社, 1987 [Li Zhishen Advance of Earth's Dynamics Beijing Ocean Press 1987]
- 31 Lambeck K. The Earth's Variable Rotation. New York: Cambridge University Press 1980 75 ~ 98
- 32 Souchay J, Loysel B, Kinoshita H. Corrections and developments in

rigid Earth nutation theory: III. Final tables REN-2000 including
crossed nutation and spin orbit coupling effects. *Astronomy & Astro-
physics Supplement Series* 1999, 135: 111 ~ 131

33 Daniel Bonn, *et al*. Delayed fracture of an inhomogeneous soft solid
Science 1998, 280(5361): 265 ~ 267

The Sedimentary Model and Quantitative Analysis of the Subaqueous Shrink Cracks

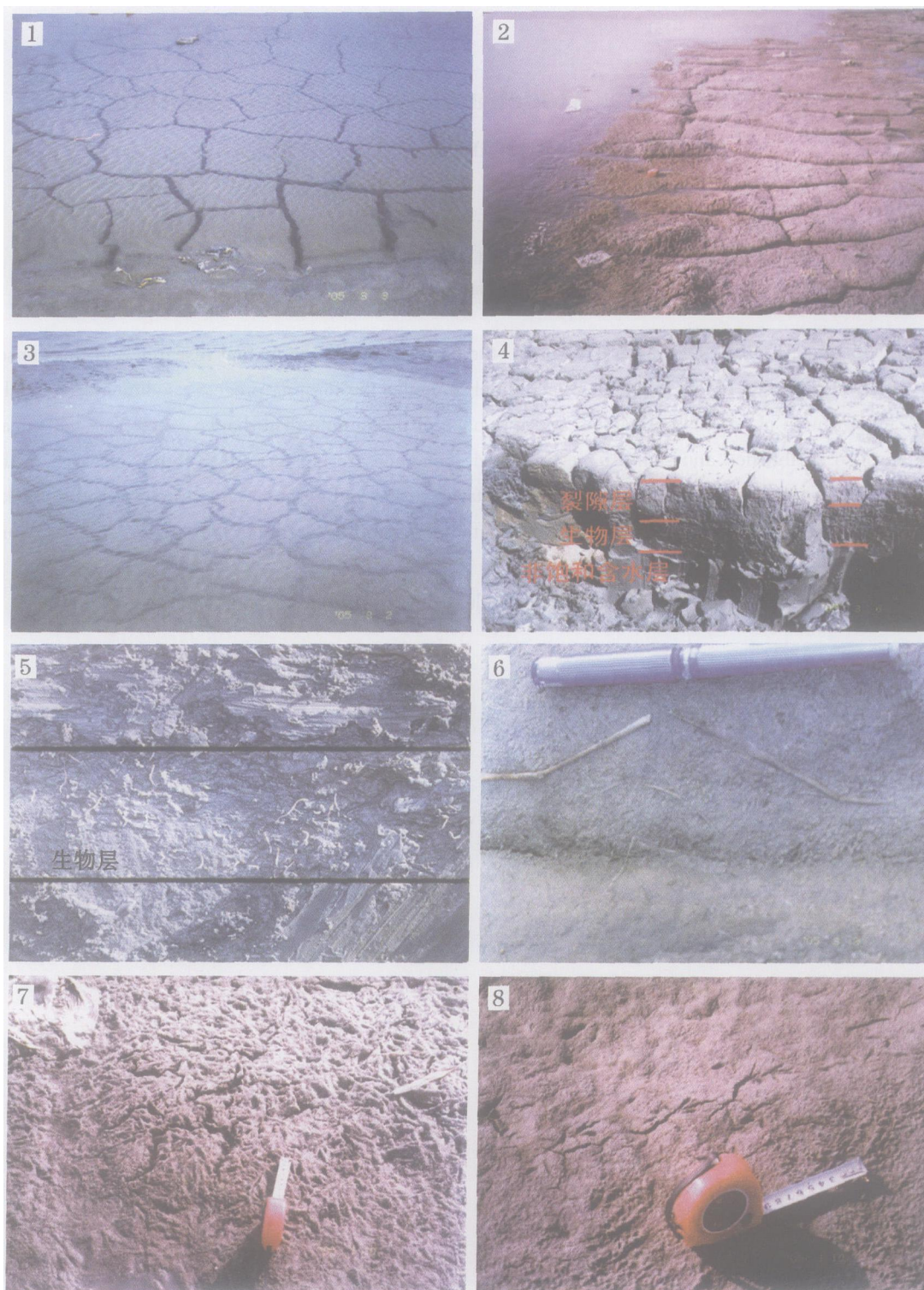
ZHOU Yaoqi^{1,2} ZHAO Zhenyu^{1,2} MA Xiaoming² JI Guoshen²

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

2. College of Geo-resources and Information, China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257062)

Abstract The subaqueous shrinking cracks have been studied in detail by the textual research and field observation, the laboratory analysis and data processing and so on, which includes the forming process, sedimentary models, quantitative grade, linearization of various parameters and influence of the minute disturbance, etc. The geological models of the cracks are also established and some suggestions and comments are put forward to future research in this field. All of these conclusions are significant to describe quantitatively the configuration and structure of the cracks and its changes, forecast the territorial dimensions and the distributed areas and differentiate the territorial geocircumstantialities.

Key words subaqueous shrinking cracks, geological model, quantitative description, prospect



图版 1说明: 1. 水下收缩矩形裂隙平面形态; 2. 半露水矩形裂隙平面形态; 3. 水下收缩网状裂隙平面形态; 4. 水干后裂隙剖面分层图; 5. 生物层扩大图; 6. 水流痕扰动开裂; 7. 冰晶痕扰动; 8. 生物足迹扰动