

黄河下游与黄河三角洲现代非地震变形层理的研究

钟建华^{1,2}, 宋冠先¹, 倪良田¹, 孙宁亮¹, 郝兵¹, 葛毓柱¹, 薛纯琦¹, 孙景耀³, 刘闯¹, 曹梦春¹

1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266580

2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东青岛 266071

3. 中国海洋石油总公司渤海分公司, 河北唐山 063000

摘要 变形层理是软沉积变形构造(SSDS)研究中的重要内容,而SSDS的研究又是沉积学、工程地质、地震学及构造地质学等近期的研究热点。但是,目前人们对地震SSDS和非地震SSDS的精确辨识还存在一定的困难,所以建立起地震与非地震SSDS的辨识标准是非常重要的,变形层理又是SSDS研究中的重中之重,因此,对变形层理的研究具有重要意义。研究表明,黄河下游现代沉积中发育了大量的变形层理,确凿的证据证明这些变形层理与地震毫无关系,因此详细地研究这些变形层理对于建立识别地震SSDS和非地震SSDS标准具有较重要意义。黄河下游(包括黄河三角洲分流河道)发育的变形层理类型及成因多样,既有典型的包卷层理,也有极不规则的一般变形层理;从成因上,既有密度或重力倒置形成的、也有波浪作用引起的滑动滑塌形成的、还有水牵引和滑动沉积物牵引形成的、甚至还有冰块拖移或压刻形成的变形层理。不同成因的变形层理具有其独特的几何学特征,可以作为其成因的可靠标志,同样也可以作为区别于地震成因的可靠标志。黄河下游发育的变形层理与黄河下游复杂的水动力条件和气候条件及沉积物粒度极细有密切关系。

关键词 变形层理;包卷层理;成因;非地震;黄河

第一作者简介 钟建华,男,1957年出生,教授,构造沉积学及非常规油气,E-mail:957576033@qq.com

通信作者 宋冠先,男,E-mail:248553505@qq.com

中图分类号 P512.2 **文献标志码** A

0 引言

软沉积变形构造是19世纪30年代通过研究冰川沉积发现的,但直到一个世纪后这种概念一直被混用,直到20世纪30年代通过模拟实验才支持了软沉积变形构造确实可以发生。软沉积物变形构造重要的事件当属1973年Sims在*Science*发表了地震成因的软沉积物变形构造论文^[1],Seilacher^[2]提出一个构造活动区未固结的水下沉积物受到地震活动改造再沉积的沉积层,从而建立了震积岩,使软沉积物变形构造逐渐受到广泛关注。冯增昭等^[3]总结道“在近三十年(1987年—2016年)中,中国的中文期刊共刊出了约140篇软沉积物变形构造及地震岩的论文,也有一些专著出版,但是,在这些论文和专著中,关于软沉积物变形构造的成因,却几乎是一个观点,即软沉积物变形构造几乎都是地震引起的,即具软沉积物变

形构造的岩层几乎都是震积岩”。但他又指出“软沉积物变形构造是多成因的”。变形层理是软沉积变形构造中的重要元素之一。有时候研究软沉积变形构造多半主要集中在变形层理上,事实上,很多时候人们已把变形层理(包括褶皱)与软沉积变形构造等同起来^[4]。变形层理的研究还有许多问题悬而未决:一是这种构造难以精确描述、分类和进行成因解释;二是这种构造有时难以与构造运动形成的构造区分开来;三是这种可以广泛的分布在多种环境的多种岩性中,给研究成因带来了多解性。变形层理多半被认为是地震成因的,所以多用来作为古地震存在的依据^[5-6]。事实表明,很多变形层理并非地震作用形成的。通过详细地研究现代非地震成因和地震成因变形层理,建立起识别地震成因与非地震成因的筛析和判别标准是非常重要的。

变形层理的几何学特点与其成因动力学和形成

收稿日期: 2017-10-31; **收修改稿日期**: 2018-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(49972037, 41172093, 41572088); 教育部博士点基金(20060425509, 20050425515, 20030425008, 2001425004); 山东省自然科学基金(Q9901) [**Foundation**: National Natural Foundation of China, No. 49972037, 41172093, 41572088; Doctoral fund of Program of the Ministry of Education No. 20060425509, 20050425515, 20030425008, 2001425004; Natural Science Foundation of Shandong Province, No. Q9901]

环境密切相关,所以必须把没有经过构造运动的现代变形层理的几何学特点进行严格的解析、同时对其成因动力学进行深入分析,再把它们与形成环境对应起来,这样才能把复杂的变形层理的科学意义阐明清楚。通过二十余年的考察,笔者发现在黄河下游和黄河三角洲上变形层理非常发育,而且其成因肯定与地震毫无关系,所以了解和认识这些变形层理对于我们识别地震成因变形层理与非地震成因变形层理具有较重要的意义。之前笔者对黄河下游的变形层理进行过相关研究^[7-8],但随着近年来研究的深入,新发现了一些不同类型的变形层理和对老的变形层理获得了一些新的认识,故写成此文供讨论。此外,由于包卷层理的几何形态和成因特殊,本文将对其作为重点讨论。

1 区域地质概况

本次研究的重点地区在黄河下游济南大桥至黄河河口河段,包括黄河三角洲分流河道,长约 220 km (图 1)。该河段边心滩发育很好,由于黄河水量冬季很小,导致边心滩广泛出露,尤其是在上个世纪九十年代黄河断流导致下游河道干涸,为研究创造了很好的条件。该河段沉积物极细,以细粉砂和黏土为主^[9]。粉砂的成分以石英为主,其次为长石,还有少量其他矿物^[10]。冰成沉积构造在该区域有广泛的发育^[11]。



图 1 研究区位置图

Fig.1 Location of study area

2 变形层理分类

黄河下游发育了大量变形层理,按成因分类可分为:牵引变形层理、河口潮汐作用变形层理、滑动滑塌变形层理、波浪作用变形层理、泄水变形层理和冰作用变形层理 6 种类型,牵引变形层理又可分为高速水

流牵引变形层理和沉积物牵引变形层理。

2.1 牵引变形层理

牵引变形层理的形成动力包括水流、移动沉积物和移动冰块三种。黄河是一条很特殊的河流,每年夏天洪水期便会漫滩,河水在边心滩上奔流,形成特殊的水文现象:沉积物集中成堆,在河水的作用下整体推移向前,在其底部与沉积物接触的界面上形成剪切力,使其下的松软沉积物发生变形,形成变形层理。冰块在软沉积物上移动也会使沉积物变形。通过仔细观察,以这种方式形成的变形层理总体有如下几个特点:一是具有很好的、但有时不连续的条带性和成层性;二是变形层理不规则;三是变形层一般较薄;四是一般发育在边心滩上。又可将其进一步分为三种,冰层或冰块拖移变形层理在后文中详述,本节仅介绍两种:

(1) 高速水流牵引变形层理

理论上水流是难以形成牵引变形层理的,因为其黏度极小,很难在沉积面上形成有效剪切力而使沉积物发生变形形成变形层理^[12]。但考虑到黄河下游现代沉积是以黏土和细粉砂为主的、并被水充分饱和的细粒沉积物,其内黏结力极低,洪水期的河水、尤其是波浪起伏的高速河水也很容易形成沉积物变形(图 2)。笔者对黄河下游刚沉积下来的细粒沉积物进行了观察,发现刚沉积下来的细粒沉积物含水量极高,黏度极低,与稀的面糊糊或豆腐脑一样,用手插进这种细粒沉积物中基本感觉不到有固体物质,用手也很难捞起成团或成块的沉积物,而是一手泥浆。所以这种细粒沉积物在高流速的作用下发生变形也是不难理解。其一般特点是顶部没有层理或层理很乱,底部层理呈囊状,其上一般为没有丝毫变形的水平层理(图 2a),有时可以形成多个变形层理被没有变形的水平层理分隔的层系组(图 2b),揭示了顶部水平层理是在静态条件下形成的,而下部的变形层理无疑是在高能条件下形成的,两者的突变关系揭示了水动力的突变更迭。整个变形层没有垂向运动或垂向变形的痕迹,揭示了底部高能变形层不是泄水和密度差异形成的,非常平整的接触面揭示了极有可能是上部高速水流牵引形成的。很明显,这种变形层理不是由地震作用形成的,其间的毫米级厚的非变形纹层是非地震成因的可靠标志。

(2) 沉积物牵引变形层理

除了洪水期高速水流在极软的沉积物上流动会导致其下的沉积物变形外,呈团块状移动的沉积物在

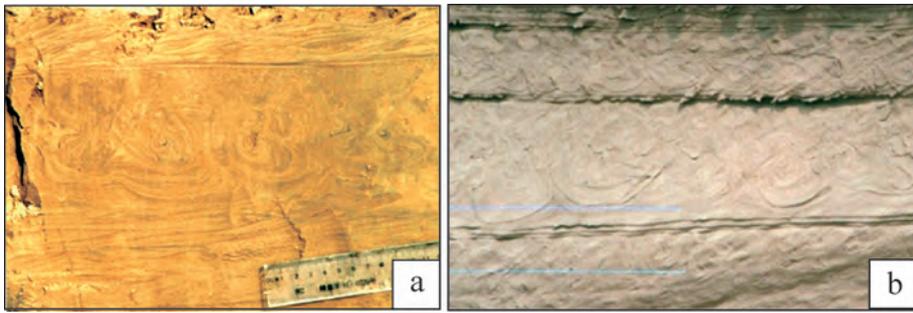


图 2 水流牵引变形层理

a.顶部因水流作用较强无层理呈块状,底部层理呈向左倾斜或倾伏的囊状,水流自左流向右;b.三层水流作用形成的变形层理,特点都相同:顶部没有层理或层理很乱,底部层理呈囊状,中间被毫米级厚的纹层分隔,揭示了强水流过后水体呈静止状。水流自左流向右

Fig.2 Current-draped deformation bedding

极软的沉积物上移动也会导致其下的沉积物发生变形(图 3)。据实际观察,在黄河汛期大量沉积物会涌上边心滩,在河面形成特殊的涌水现象。团块状沉积物在软沉积物上移动时也会对下部的软沉积物形成剪应力,进而使其下的软沉积物发生变形,形成变形层理。其特点如下:1)变形层理形态较复杂,有时呈囊状,倾斜 35°左右,常常具有一定的方向性(图 4a, b)。其成因系推移的堆状沉积物在移动的过程中对其下部的松软粉砂形成了水平方向的剪切,使其下的粉砂发生变形(图 3),形成了这种开口朝泥砾层移动方向的囊状变形层理。这种囊状变形层理的规模一般很小,直径在 2.5 cm,长 7~8 cm;2)变形层理之上常有一层以细泥砾为主的块状薄层(图 4),是形成变形层理的作用层,为河流侵蚀形成的底部滞留沉积,系高速的河水冲蚀、类似于浊流底部的高密度部分。3)变形层之上多为凹凸不平的作用面(图 3, 4);4)总的规模一般较小,尺度多在 10 cm 以下。

2.2 河口潮汐作用变形层理

在黄河口水文站以下 1 km 左右发育了大面积的中型变形层理,其主要特点如下:1)连片连续出现,极不规则,或少数呈褶皱状,长轴大部分垂直或大角

度斜交河流方向。2)规模相对较大,宽度在 30~40 cm,表面高度可达 5~10 cm,内部深度也可以达到 10~20 cm。变形纹层较厚,约 3~4 mm。所以表面参差不齐,且起伏较大。3)常与侵蚀沟槽一起发育,其表面也常被侵蚀,揭示了水流速度极大,进而也可能揭示了变形层理的成因与高速水流牵引有关。4)发育在河口,大面积出现。5)与冲蚀坑穴共生,揭示了其形成时水流速度很大。这种变形层理的成因可能与退潮有关,退潮引起河水快速向海流动,使得软沉积物发生变形,形成了大量规模相对较大的变形层理(图 5),关于这种变形层理的具体成因还有待深入研究。

2.3 滑动滑塌变形层理

在黄河下游比较常见,因为黄河下游滑动滑塌非常频繁(图 6a, b)。黄河下游的沉积物以细粉砂和黏土为主,这种物质孔隙度较大,也极易液化,在很弱的波浪或流水的作用下便会液化,使其上的沉积物(有时厚度可达 2 m 以上,图 6a)失去原来固定的支撑力而产生滑动滑塌,形成滑动滑塌变形层理。特点是:1)沿边心滩内滩缘顺河道分布,长轴平行河道(图 6c, d);2)规模相对较大,高度可达 10~40 cm,沿河

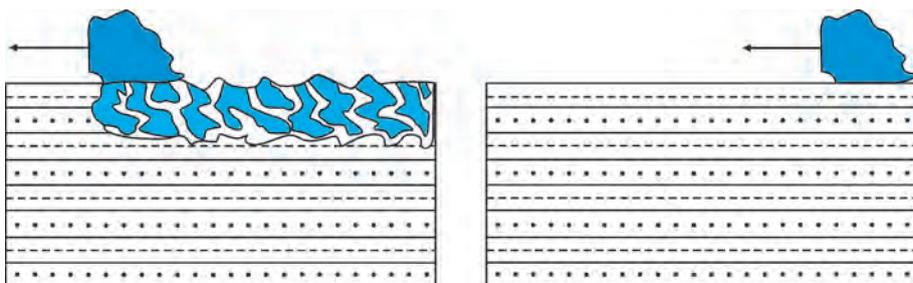


图 3 沉积物牵引形成变形层理示意图

Fig.3 Sketch of sediment-draped deformation bedding

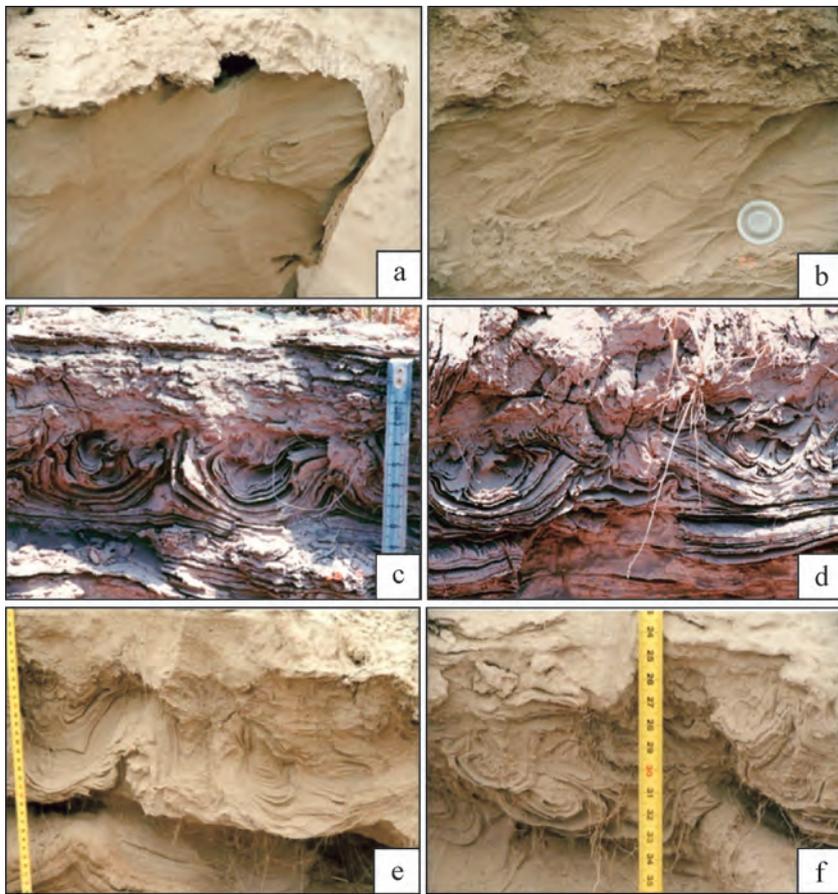


图4 沉积物牵引变形层理

a.管状变形层理,系上部两图的垂直剖面,由3~4层小型不规则变形层理叠置组成;单个变形层理规模很小,高宽多在2~3 cm,彼此边界不清晰,产于细粉砂中,顶部为一层1 cm厚的细泥砾层,系高速河水携较厚的沉积物冲蚀牵引形成的(但不是目前上部的沉积物);b.囊状变形层理,呈囊状,顶部有一层较厚的细泥砾层,内部有微弱的平行层理,是高速流动形成的,两者之间呈突变接触;c.变形层理,类似于包卷层理,向斜宽“U”形,背斜尖窄,顶部有一层较厚的细泥砾层,内部似乎有微弱的平行层理,是高速流动形成的;两者之间呈突变接触,很可能是包卷层理受到了削截改造;d.变形层理,背斜呈宽扁梯形,注意左侧向斜底部有一系列微突起的纵肋,其宽度和高度都在1 mm左右,向斜内部有多个细小不规则的内核;由顶部的高密度沉积物牵引形成的;顶部有一层较厚的细泥砾层,内部似乎有不连续的平行层理;两者之间呈突变接触,很可能是包卷层理受到了削截改造;e.不规则的变形层理,规模稍大,高10余厘米。顶部有一层较厚的细泥砾层,内部无任何层理,呈块状,两者之间呈突变接触;f.管状变形层理,极少见,左中下者呈不完整椭圆形或结核状,近水平,与其他不规则变形层理一起产出,规模很小,直径在1~2 cm,可见部分长4~5 cm,系上部的洪水期沉积物自左向右牵引对下部的软沉积物牵引形成的

Fig.4 Sediment-draped deformation bedding

道延长数米到数十米,甚至更长;3)形态多较复杂(图6e)。长轴多顺河道分布;4)顶部突变为滑动滑塌的脆性变形,包括滑塌角砾。

这种变形层理有时连续性非常好,图6f就是一个很好的实例,从图6f可以看出这种层理的向斜和背斜等势发育,细层或纹层在较长的距离内保持厚度变化不大,仅在局部有折断尖灭现象,恢复其原始长度大概在80 cm,目前缩短到不到30 cm,侧向缩短系数达3左右,可见其缩短量非常之大,在如此之大的缩短情况下还能保持细层的连续完整,要求细层要有

很好的塑性和保持细层连续变形的的外部条件。所以,本文推测变形是在一种在完全液化的状态下受到了较强的侧向牵引下进行的,即变形层在一种完全液化内部失去黏结力的条件下发生变形,否则难以形成这种大尺度的连续和谐变形。根据其顶部一个毫米级的纹层贯彻整个变形层理的顶部,就可以推测,变形是发生在上部纹层沉积之前的一个“开放”沉积系统中,即变形发生在上部未接受沉积之前。卷入变形的细层只有30层左右,其原始厚度约4 cm多,因为变形导致侧向缩短而垂向加厚,最大达14 cm,加厚率

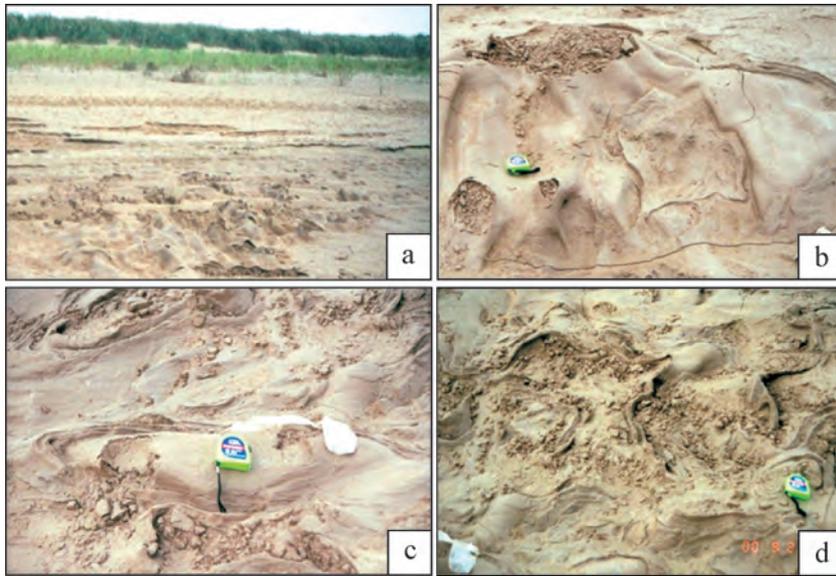


图5 潮汐作用形成的变形层理

a.大面积的潮汐作用变形层理,保持了表面较高的起伏和与冲蚀沟槽一起发育;b.像皱布一样的变形层理,形态很不规则;c.面包状凸起的变形层理,表面被冲蚀了5-6层;d.被冲蚀强烈的极不规则变形层理

Fig.5 Deformation bedding affected by tidal action

也在3倍以上。

黄河下游的滑动滑塌构造与斜坡没有关系,而是一种在近于水平或极微倾斜的条件下形成的,我们观察到在济南泺口边滩坡度小于 1° 的情况下也能形成滑动滑塌构造。前期主要机理是波浪的震荡使边心滩脚发生液化,失去了支撑力,导致上部的沉积体发生滑动滑塌(图7)。所以,滑动滑塌的本质也是液化,而不是斜坡或陡坡的重力作用。

2.4 波浪作用变形层理

波浪的上下起伏引起沉积物表面或浅层反复颠簸,也会使刚沉积下来的沉积物发生液化而形成变形层理。这种作用形成变形层理的机制有两点:1)使沉积物液化,使沉积物内部的颗粒之间失去黏结力,变成与水一样的状态,在很小的作用力下就会变形形成变形层理;2)波浪作用,一方面使沉积物液化,另一方面使沉积物排出其中过多的水分变得致密,这种变化与液化程度密切相关,液化越大致密化就越强烈,而液化又随深度增加而减弱,所以就会导致沉积物发生密度倒置,使靠近顶部的沉积物密度变大,形成“自激”密度倒置而发生软变形形成变形层理。这种机制形成的变形层理以包卷层理多见。包卷层理的纹层由等厚的细粉砂和黏土组成,看上去没有明显的由物质组成不同而引起的密度倒置。在西班牙 Guadalquivir Basin 盆地也有风暴波浪作用形成的变

形层理^[13-15],那些层理(文献[14]图2)也与包卷层理非常相像。

变形层理中有一种既特殊又非常重要的类型,即“包卷层理”,也可以称为“滑动层理(sliding beddings)”、“层内扭曲(intra-stratal contortions)”或“皱痕层理(crinkled bedding)”^[16],可见这是一种非常复杂的层理。这种层理往往认为是浊流形成的,是浊积岩第三段(Tc)的产物,但作者在黄河下游和黄河三角洲上也发现了很典型标准的包卷层理。因为目前对这种层理的成因还存在诸多争论,所以本文将重点介绍和讨论这种层理,以便今后大家对这种层理成因和环境有个新的视角。这种层理以其较规则的几何特点而引人注目。Dzulynski *et al.*^[17]认为“包卷层理”是一种“负载包卷”,其类型复杂,包括含水塑性变形。这种变形可以有中断,但不会完全破坏原来的层理。由于波痕引起的沉积表面的起伏和内部物质的不均一、泥帽(mud capping)及差异压实会派生出侧向运动。所以,大家通常认为,“包卷层理”是在一种部分液化、在泄水过程中强度变小的过程中形成的^[18]。公认的机制是沉积层孔隙压力的增加,多由地震引起的突然固结造成,包括由大浪拍打或地震震动引起的所谓旋回性负载导致沉积密度倒置^[19-20],使碎屑颗粒的接触关系变化而失去强度,孔隙压力暂时增大,超压使沉积物液化。



图6 波浪作用形成的滑动滑塌变形层理

a. 滑动滑塌构造。规模较大, 滑塌高度近2 m, 但滑塌宽度很小, 不到1 m, 主要是滑塌块体大部分已被河水冲走。同样仅保留了上部滑塌带, 中部的滑流带和下部的流动带均被河水冲走。滑塌面很陡, 近直立, 甚至向内凹陷(因为层理或层面的弱结合), 使边滩上部呈突出的屋檐状。从图片中人物脚下的水位线痕可以看出曾经受到流水的作用; b. 正在形成中的滑动滑塌构造, 发育在一个侵蚀沟槽的侧壁上。规模不大, 宽不足2 m, 高40余厘米。仅保留了上部滑塌带, 中部的滑流带和下部的流动带均被河水冲走。滑塌面弧形, 自右向左倾角逐渐增大, 从 20° ~ 30° 增大到 50° 左右。可以分为3~4个主要滑动带, 在滑动带内不同滑塌块体或滑塌板片的滑动量不大, 仅形成一些内部撕裂, 在表面显示出一些相对较小的裂缝。在滑动带之间滑动量较大, 落差可达6~7 cm, 滑塌面呈弧形。由河水冲刷边滩滩缘形成。黄河下游胜利大桥桥下; c. 变形层理。可见部分呈背斜状, 背斜宽圆, 未挖掘而未见到背斜之间的向斜; 规模较大, 最大宽度多在10~20 cm, 可见高度在4~5 cm; 其延长方向与河流一致, 由边滩滑动滑塌牵引形成; d. 变形层理。上图某背斜层理的局部放大图片, 可见呈宽圆不对称背斜状, 上侧较陡, 下侧较缓, 较陡一侧面向河岸, 正对边滩滑动方向。顶部因河流侵蚀而不完整, 暴露了内部的结构, 其最大宽度近20 cm, 可见高度在5 cm; 其延长方向与河流一致, 由边滩滑动滑塌牵引形成; e. 大型不规则滑动滑塌变形层理, 可见高度达40~50 cm, 形态极不规则, 有脆性断裂发育; f. 滑动形成的较大的连续紧闭软变形褶皱状变形层理。规模较大, 高度在10~14 cm, 呈非常连续的褶皱状, 细层可以从最左侧开始一直延续到最右侧

Fig.6 Slump deformation bedding affected by wave action

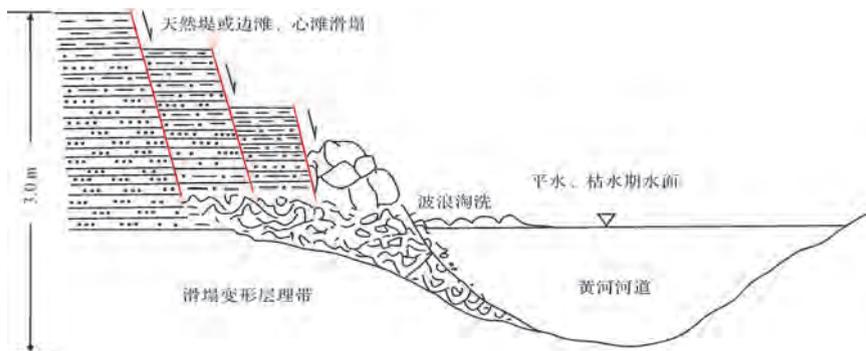


图7 滑动滑塌变形层理的形成过程(据钟建华等^[13])

Fig.7 Formation process of sliding collapse deformation bedding (after Zhong *et al.*^[13])

包卷层理是一种很常见的变形层理,但也是一种定义不明,名称混乱的层理。有人把包卷层理严格的定义为规则褶曲状,但其向下凹的向斜必须发育较好,形态上宽圆或底部平坦,而向上突的背斜发育不如向斜,形态上尖窄(图8),相当于Allen^[21]的类型D层理。所以有人又把“包卷层理”称为“包卷褶皱”^[22]。但也有不少人把一般的变形层理归为包卷层理,而把典型的包卷层理视为碟状构造^[23]。de Boer^[24]还把斜歪的变形层理或斜歪的微型褶皱称为“包卷层理”。

在黄河下游和黄河三角洲上,包卷层理非常发育(图8),估计占整个变形层理的一半以上。具有如下特点:1)形态一般较好,呈对称的向斜宽阔、背斜尖

窄的褶皱状;向斜的底部宽圆或平坦。底部和下部的纹层一般连续性较好,而上部或核部的纹层连续性差,往往为极其紊乱的纹层或砂团。2)规模较小,高宽多在3~5 cm。3)层位很稳定,侧向延伸可达数十到数百米。4)一般发育在毫米级厚的粉砂黏土互层中,且经常成多层叠置状,每一个变形层理是一次洪峰的产物。成层性极好,顶部界限非常整齐,可能是一个浪基面。其上部的纹层非常平坦,很明显是在包卷层理形成之后静水条件下垂向加积沉积的。底部界限不如顶部清晰,有明显的穿层现象。其间的隔层可以很薄,最薄可达1~2 mm,而且没有丝毫变形(图8a,b),是区别于地震成因的关键特征。5)另一个重要的特点是,顶面呈侵蚀接触,或有时顶面可见向斜

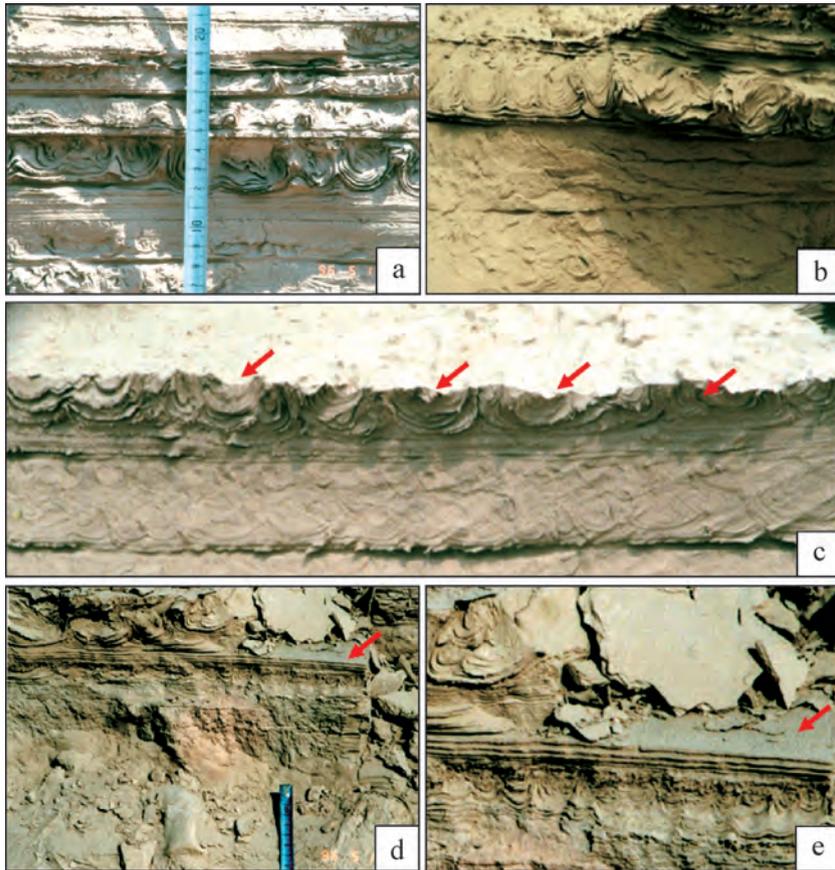


图8 小型包卷层理(背斜宽阔,向斜尖窄,轴面直立)

a. 6层变形层理叠置,自上而下厚度逐渐增加。上部四层为包卷层理,最下一层为不规则变形层理。山东东营黄河胜利大桥,现代沉积。中间的一层发育完善,其宽高接近,连续性和谐性较好,“向斜”发育较好,而“背斜”发育不完善,多呈低幅背斜状。山东东营黄河胜利大桥,现代沉积;b.包卷层理。左侧4~5个为规则的包卷层理,右侧2~3个为不规则的包卷层理。规则包卷层理主要特点:向斜宽圆、背斜尖窄,宽高近于相等,在2~3 cm,细层在1~2 mm。下部泥质纹层略多,上部砂质纹层略多;c.层面上可见向斜和背斜的核部隆起成脊状,脊宽5~6 mm,脊高3~4 mm,纵向连续延伸长度在3~5 cm,如果再考虑到隆脊有可能还会向外延伸,那么有理由推测包卷层理在其轴向上延伸长度远大于其宽度。图片的剖面方向是平行河流的,所以包卷层理的隆脊垂直于河水,与波浪的延伸方向一致。下部囊状变形层理是水流作用形成的;d.不规则包卷层理。注意右侧的平台层面上有非常纤细的平行纵肋。揭示了包卷层理在形成过程中沿该层面有侧向“收缩”,把下面的粉砂“收缩”成了纵肋;e.图d包卷层理右侧平台的放大图。可见一系列近于平行的纵肋

Fig.8 Small-scale convolute bedding (Note the wide syncline and narrow anticline. The axial plane is mostly upright)

和背斜的核部隆起成脊状(图8b),脊宽5~6 mm,脊高3~4 mm,纵向连续延伸长度在3~5 cm,如果再考虑到隆脊有可能还会向外延伸,那么有理由推测包卷层理在其轴向上延伸长度远大于其宽度。图片的剖面方向是平行河流的,所以包卷层理的隆脊垂直于河水,与波浪的延伸方向一致,很可能与波浪作用动力方向有关(波浪作用多数情况下垂直水流方向)。因此本文认为,包卷层理是受波浪动力控制形成的,而不是一个简单的随机重力均衡成因。

以上简要地介绍了黄河下游包卷层理的几何学特点,以下再简要地分析一下其形成过程和形成动力。据观察,不是所有的砂泥沉积序列都能形成密度倒置并发育包卷层理,据在黄河三角洲上的观察,只有满足下列几个条件才能发育包卷层理:1)快速沉积。据实际观察,沉积速度大概每小时在5~10 cm以上。因为只有这样,刚沉积下来的泥才能呈絮状或酸奶状,没有足够的时间来固结形成具有一定强度的粉砂黏土层以支撑其上的砂泥层。因为浊积岩一般也是快速沉积的,所以在浊积岩中也可以发育这种包卷层理。2)要发育出完好的包卷层理(高宽比大于1/2),泥砂均要达到一定的厚度,在下部泥纹层的累积厚度要略大于砂纹层的累积厚度,而在上部砂纹层的累积厚度要大于泥纹层的累积厚度,或者两者厚度相等,但上部泥纹层的累积厚度不能大于下部砂纹层的累积厚度。纯砂和纯泥都不利于发育包卷层理。3)包卷层理的底部往往有一个易于滑动的面,在这个面上有时有一系列与“背、向斜”轴平行或垂直的微小脊突,这些脊突高、宽多在毫米级、长数厘米(如图8f,g)。这些脊突是包卷层理形成过程中沿侧向滑动形成的。在鄂尔多斯盆地的侏罗系延安组中也发育了大型的包卷层理,其底部也有明显的由侧向滑动形成的一系列滑动面和脊,但脊的方向与包卷层理的“背、向斜”轴垂直,脊宽1 mm左右,高也在1 mm左右;滑动面的宽在3~5 mm。4)在泥沙纹层等势发育的情况下要形成这种包卷层理的最重要前提是,必须有波浪的作用,在波浪的作用下上部的密度才会高于下部(图9b),而且发生液化易于塑性流变,否则就难以形成这种对称性极好的变形层理。前人早已发现包卷层理的成因与密度倒置有关^[24],并认为密度倒置与某种外部的冲击(external shocks)有关,而这种冲击来自于地震。此外,水下滑动滑塌和层内的流体作用也可能形成这种包卷层理^[23]。当然,许多学者认为包卷层理的成因与浊流有关^[23]。

从黄河三角洲和其他地方的实例来看,包卷层理主要发育在边、心滩上,三角洲也是包卷层理发育的良好场所。本研究认为,包卷层理一般是洪水期的产物,每一个包卷层理层都是一次洪峰的产物,形成包卷层理过程非常迅速。包卷层理的轴面一般垂直河道。黄河三角洲上的包卷层理非常和谐的形态和结构特点揭示其成因有种很和谐完美的机制,笔者认为,除了与沉积物本身高度均一和谐外,还与边、心滩上和谐的波浪作用有关,波浪作用的正弦波性决定了包卷层理的美妙对称和等间距性(图9a)。波浪的波峰和波谷在波动时对其下的沉积物具有不同的压力(图9b,c),尤其是波浪上下起伏使得其下的被水饱和的沉积物遭受循环的应力作用,这种作用使得颗粒旋转和上下(甚至左右)移动,失去原先的颗粒支撑,被水悬浮起来形成液化,进而形成自上而下的紧密堆积和密度倒置(图9b,c),最终形成包卷层理而达到稳定状态(图9d)。实际观察也表明,波浪的作用可以使沉积物发生紧密堆积,密度加大,同时还可以使沉积物发生液化,内摩擦降低,塑性和流动性增强,为形成包卷层理创造了条件。在包卷层理的向斜中心沉积物密度最大,向两侧降低,所以包卷层理的中心是沉降最大的地方,而两侧沉降幅度最小。但de Boer^[24]发现反向密度差(或负密度差(negative density gradient))也能形成包卷层理,但形成动力与泄气有关。在黄河三角洲我们也观察到了这种现象^[8]。Owen^[25]也认为波浪作用可以形成液化,从另一个侧面表明软沉积物变形可以由波浪作用形成。从包卷层理的变形幅度看,其最大变形幅度可达1.5(连续纹层的长度除以包卷层理的宽度)以上,即变形层理在保持其连续完整性的条件下伸长一倍多,表明了它们在变形时黏塑性非常好。我们曾经做过一个模拟实验,在玻璃盒子里用手拍击水面形成波浪,成功的在沉积物中获得了与包卷层理非常相似的变形构造^[8]。许多学者探讨过包卷层理的成因,结论都是由泄水形成的^[26],但也有人认为泄气也能形成包卷层理^[24]。

多数人认为包卷层理的成因与地震密切相关,有人甚至认为只有6~7级以上的地震才能形成包卷层理^[27]。从上可以看出黄河下游和黄河三角洲上包卷层理的成因与地震没有任何联系,只是一种简单的沉积过程加上波浪作用和重力调整的产物,机制与波浪的震荡液化和形成密度倒置密切相关(图9c,d),笔者用模拟实验证明了这一点^[8]。Dalrymple^[28]在加拿

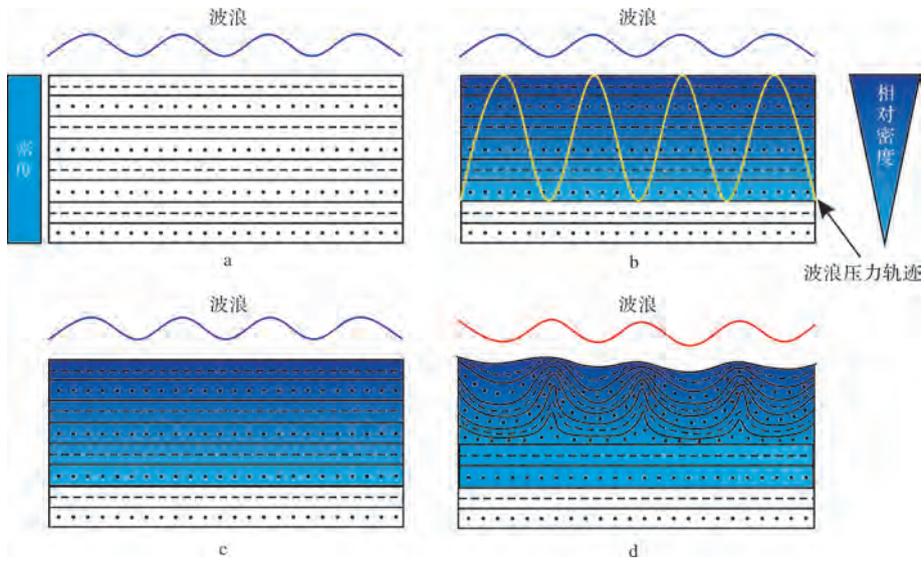


图 9 波浪作用形成包卷层理过程示意图

a.砂泥互层;b.受波浪作用发生密度倒置和液化(仅表示波峰向上和波谷向下的波动过程的一瞬间,而不是静止状态);c.在波浪的诱发下密度倒置失稳;d.重力调整形成包卷层理

Fig.9 Schematic of the formation process of wave-triggered convolute bedding

大的新斯科舍岛 Cobequid 湾也发现由波浪作用形成的包卷层理。从上可知,多种证据表明非地震可以形成包卷层理。无疑地震和浊流也会形成包卷层理,但不是所有的包卷层理都是地震形成的,甚至有可能大多数包卷层理都是沉积形成的。最后我们想提及一下,既然包卷层理在几何形态和成因上与一般的变形层理有别,再加上有相当一部分学者认为它是一种特

殊的变形层理,而愿意给予它一个特殊的名称“包卷层理”,我们认为应该接受这个名称,把它从一般的变形层理区别开来。

2.5 泄水变形层理

这种变形层理极不发育,比较典型的是发育在泥沙火山中的伴生构造。规模很小,尺度多在 3~5 cm 以下,形态也极不规则,连续性也很差(图 10)。

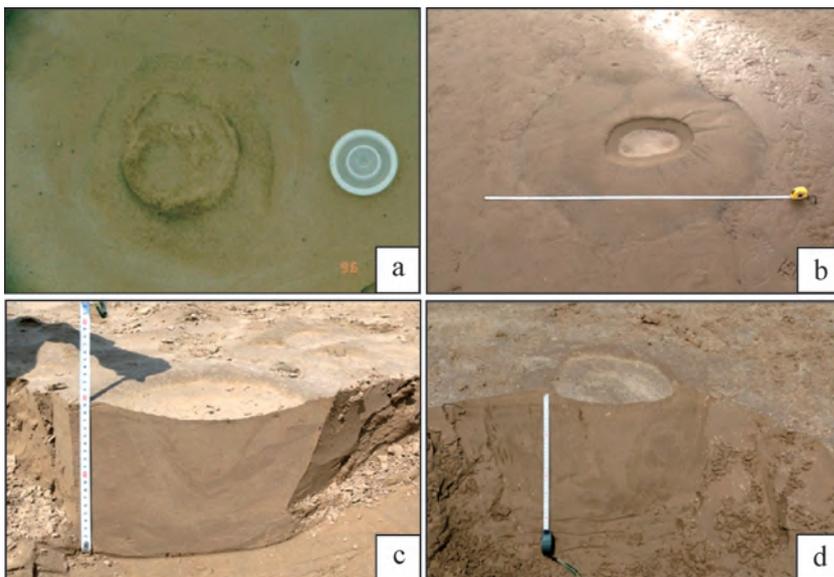


图 10 泄水变形层理

a.泄水管,顶面视图;b.泥沙火山,非常扁平;c.泥沙火山的竖截面,可见极不规则的小型变形层理;d.泥沙火山的竖截面,可见极不规则的小型变形层理

Fig.10 Water-escape deformation bedding

2.6 冰作用变形层理

冰的地质作用(冰融冰冻, freezing and thawing)也是一种常见的地质现象,只要不是在热带特高海拔(乞力马扎罗山),冰的地质作用就能发生,在温带和寒带,冰的地质作用应该是一种常见的地质现象,但直到目前为止国内对冰成沉积构造的研究还很少^[6,8,29-33],许多基本的现象还没有得到充分认识和必要总结。只要暴露和浅层沉积物含水,冰的地质作用就不可避免会发生,最为常见的一个自然现象是冻土。当沉积物被冰作用后多多少少会发生一些变化,有的变化会很大,甚至会深刻的改造沉积物,使其面目全非。所以,本文认为,大陆内部的沉积物(河流、滨浅湖)大多数都经历了冰的地质作用,有的甚至留下了记录,以往对此重视不够。在黄河下游和黄河三角洲上冰融化及冰层、冰块作用形成的变形层理非常

发育,广泛地分布在边心滩上。

(1) 冰层或冰块拖移变形层理

黄河下游和黄河三角洲上最常见的冰作用现象是冰工具痕(图 11a, b, c)。移动冰工具痕是由冰块在未固结沉积物上移动形成的痕迹(图 12),其主要特点是线状、粗细深浅均匀(图 11a, b, c)。在黄河下游胜利大桥附近这种冰工具痕非常普遍。规模大小不一,大者宽 1 m 多,长数百米,深 1~2 m;小者宽数厘米,长 10 余厘米。冰工具痕总体呈直线、近直线、弧线或折线状。总体顺河道延伸,但在边滩边缘则向河道中心弯延。有的冰工具痕末端可以见到一冰块或有该冰块融化形成的特殊印模或由冰融化形成的特殊沉积和特殊沉积构造。有两个重要特点:1) 冰工具痕是由冰块在水流的作用下沿软沉积物表面运动形成的,因此冰工具痕会破坏原有沉积构造的连续

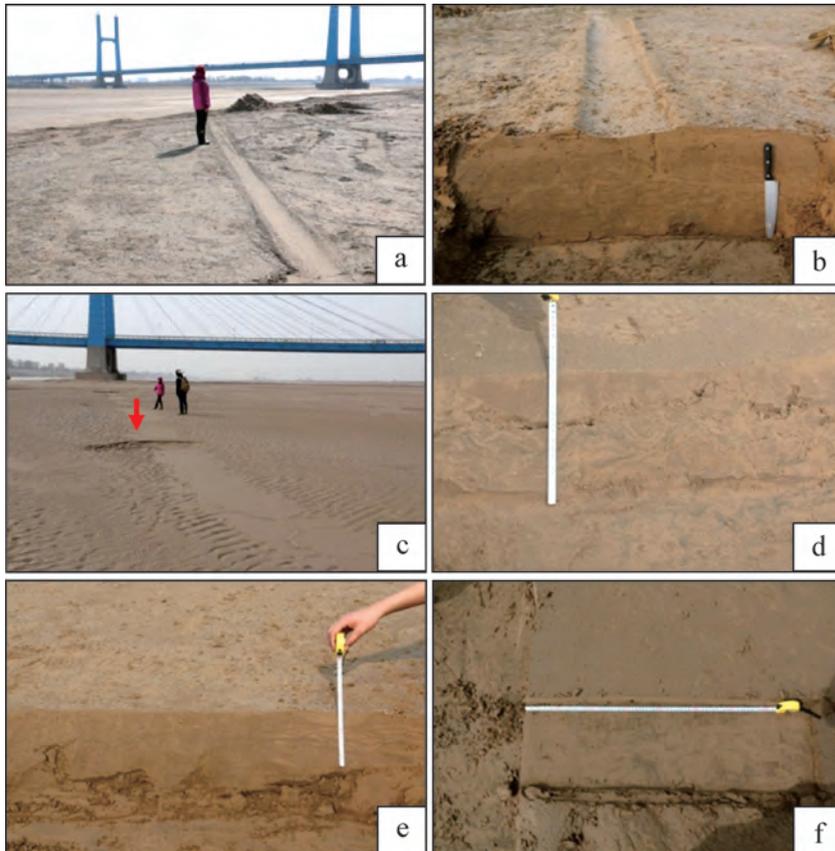


图 11 冰工具痕及其变形层理

a.大型圆槽状冰工具痕。外观上类似于圆槽,长 16.3 m,宽 40~60 cm,深 3~5 cm,脊高 2~3 cm。延伸方向斜交边滩延伸方向或河流流向。背景为黄河胜利大桥;b.左图的横竖截面。可见极小型的不规则变形层理,尺度在 3~5 cm,最表层被强烈扰动层理完全消失呈块状,其下则为变形层理带;c.大型的冰块滑移痕,向下游呈微阶梯状。宽近 1m。在中后部有两个冰融塌陷坑穴(红色箭头所指),两侧为小型流水波痕,揭示了冰工具痕形成于波痕之后。心滩。现代。远处为胜利大桥。垂直水流和垂直冰块滑移方向。变形层理厚近 20 cm。顶部有 10 cm 左右扰动强烈,呈块状,几乎以一个近水平的不规则裂缝分开两者,表明冰块作用强度沿此面发生了分异。平行冰工具痕作用面的变形层理多呈不规则圆形或椭圆形,揭示了大多数变形层理呈丘形隆起状;d~f.大型的冰块滑移痕竖直横截面。可见不大规则的包卷层理和其他变形层理

Fig.11 Ice tool mark and related deformation bedding

完整性,而形成自己特有的构造,如皱纹、刻划沟脊或平滑沟槽。由于冰块滑移过软沉积物,使沉积物液化形成紧密堆积,进而使沉积物塌陷形成沟槽(图 11a, b, c); 2) 冰工具痕最顶部由于冰块作用强烈而破坏了层理,呈致密状,而下部则发育变形层理。一般说来,形成冰工具痕的冰块长轴垂直水流方向。此外,在冰层发育的沉积界面上往往会发育大面积的变形层理(图 11d, e, f),但由于冰层或冰块融化消失,这种变形层理的成因往往会被解释成其他的成因。三是变形层理在顺流方向多呈向下游斜歪的褶皱状(图 12B),在横向则为不规则的包卷层理状(图 10)。

不像前者成因那么明显,有些冰作用形成的变形层理可能与冰冻冰融作用有关。如图中的变形层理发育在一个冰作用面上,具有明显的不连续层控性。规模很小,高度多在 10 cm 以下,可见管状或鞘状变形层理(图 13a, b),可能与冰块沿软沉积物移动形成的剪切作用有关。但大多为包卷状变形层理(图 13c, d),与前述的冰块滑移形成的变形层理类似,但

总体特征又有不同,如少见脆性断裂,规模也明显偏小,可能与冰块大小有关。在没有发现其他冰川构造,尤其是没有发现冰作用面(图 13d)时要识别出这种类型的层理是非常困难的。这种变形层理还有待深入研究。

(2) 冰压刻变形层理

冰层或冰块压在细粒的松软沉积物上会形成冰压刻变形层理,但这种层理规模一般不大,形态也极不规则(图 14),连续性也很差,但以表明出的注形为重要特点。在没有发现其他冰成构造时这种冰压刻变形层理一般不易识别。所以在古代岩层里很难识别出这种变形层理。

(3) 冰融塌陷变形层理

这种层理也比较多见(图 15),但过去一直未得到识别而受到忽视。这种层理的形成动力学过程也与冰层或冰块融化消失形成的塌陷挤出或塌陷下沉有关,这种变形层理的成因往往会被解释成其他的成因。往往呈孤立的点状或团状发育在边心滩表面,规

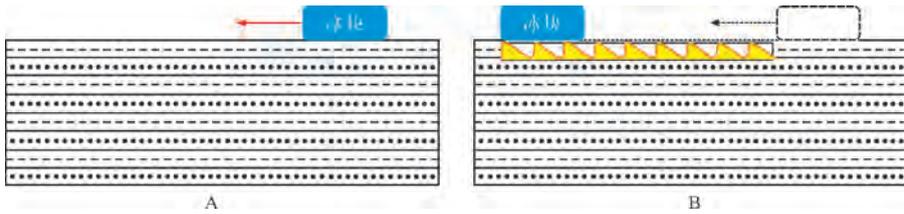


图 12 冰块滑动拖拽形成的变形层理

A.冰块未移动时的状态;B.冰块移动后形成的(拖拽)变形层理

Fig.12 Deformation bedding induced by dragging a block of ice

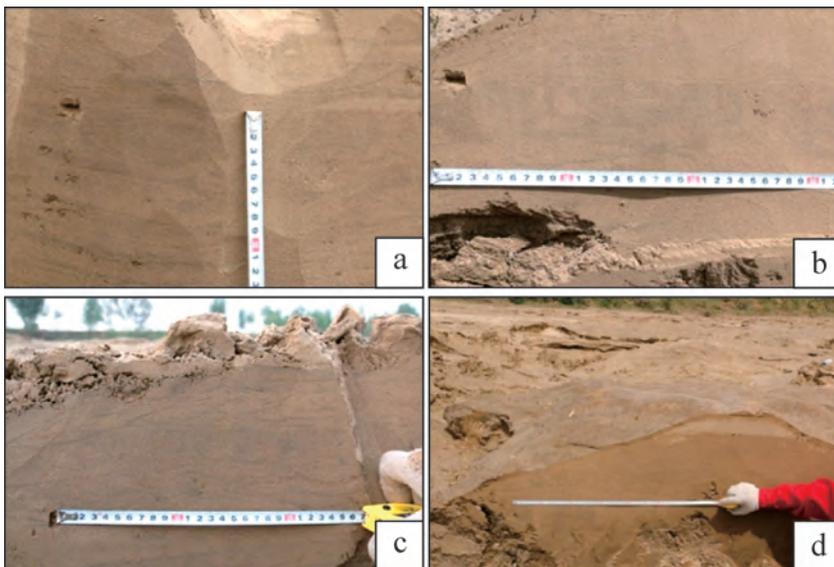


图 13 冰作用面上的变形层理

a.规模极小,呈椭圆形,很像管褶皱,可能与冰块与沉积面滑移剪切有关;b.呈管状,成因可能也与冰块与沉积面滑移剪切有关;c.冰作用面上的变形层理,有点类似于包卷层理;d.注意后面的坑穴为冰融化后形成的,其底与变形层理是同一界面,说明了两者之间有一定关系

Fig.13 Deformation bedding on ice surface

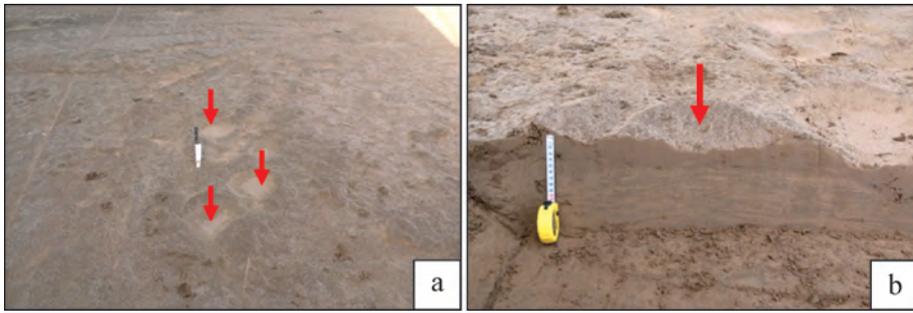


图 14 冰压刻变形层理

a.成群出现的圆形冰压刻痕(红色箭头所指);圆形或近圆形,锅状状,边缘发育有唇状突起;大者直径在 20 余厘米,深 4~5 cm;小者数厘米,深 2~3 cm。心滩。现代。黄河下游胜利大桥之下;b.过圆形压刻痕中心的竖直截面,可以见到下部的小型交错层理及其微弱的小型变形层理;发育圆形压刻痕的薄层没有层理,呈均匀块状,可能同时受到了冰块的拖移等作用形成的强烈扰动;但底部有微弱的变形层理,明显受到了冰层的扰动。黄河下游胜利大桥之下

Fig.14 Ice-carved deformation bedding

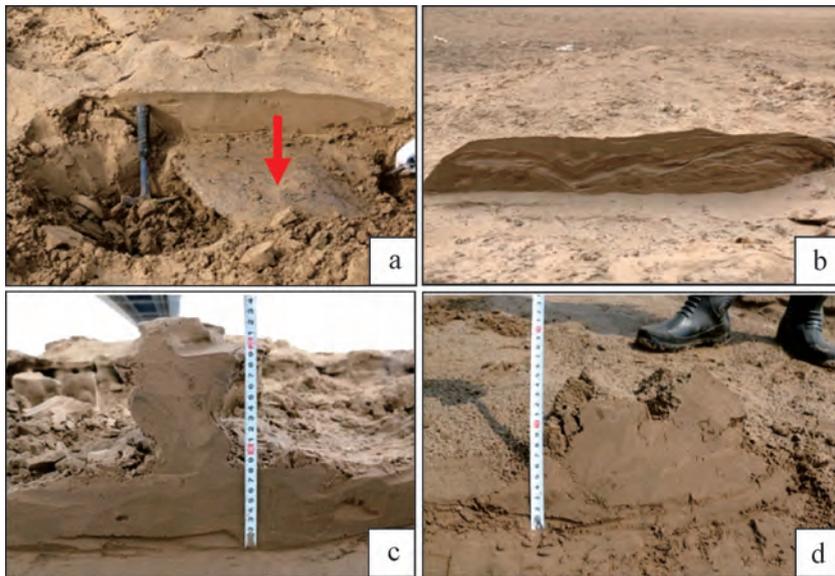


图 15 冰融塌陷变形层理

a.在冰作用面上还有一块未完全溶化的小残冰块(红色箭头所指),当这块冰消融后会导致其上的沉积物发生变形,形成变形层理;b.冰消融后形成塌陷,导致其上的沉积物发生变形,形成变形层理;c.发育在砂蘑菇内的特殊变形层理,极不规则;d.发育在冰融挤出构造(冰成开花馒头)中的变形层理,极不规则

Fig.15 Ice-melt collapse deformation bedding

模都不大,尺度多在 5~10 cm;变形极不规则,不连续层控性明显,多与其他冰成构造共生或伴生发育在边心滩上。该项工作有待今后深入。

以上简要地介绍了黄河下游和黄河三角状上的非地震成因变形层理,我们把它们的特征、形成动力机制及其形成环境总结在表 1 中,以便分析对比。

3 结语

综上所述,黄河下游和黄河三角洲上发育了丰富的变形层理,具有多类型、多尺度和多成因的“三多”

特点。通过观察,作者认为变形层理首先都是从简单的(不规则)褶皱变形开始的,然后逐渐加强,直到其强烈变形到极其不规则、甚至褶断,是一种不断递进的连续变形过程。所以像构造变动形成的一般褶皱一样,可以找到两个重要的参数来表征其从简单到复杂的演化过程,这两个参数是轴面产状和翼部的对称性。以规则的包卷层理为代表的轴面直立和两翼近于对称的变形层理与垂直密度调整有关,多半是波浪震动形成的密度倒置形成的;而轴面斜歪和两翼不对称的变形层理多半与水流牵引、沉积物牵引、滑动滑

表1 不同成因变形层理的特征及形成动力机制与产出环境

Table 1 Features, dynamic mechanisms and environments of deformation beddings having a different genesis

类型	规模	形态	顶底接触关系	形成动力机制	产出环境
高速流水牵引变形层理	规模很小,高度在10 cm以内	褶皱状,顶部多完全液化呈块状	底面渐变,顶面非常平坦,突变为未变形层	高速波动水流向前流动形成的剪切牵引	边滩、心滩边缘靠河道
沉积物牵引变形层理	规模很小,高度在10 cm以内。局部连续成短条带状	变形强烈,向下游倾倒,少数呈囊状、管状	底面渐变;顶面参差不齐,多为突变,常为细泥砾的粗粒层	洪水期沉积物在高速流水的作用下贴底移动形成的剪切	边滩、心滩边缘靠河道或内部
河口潮汐作用变形层理	规模较大,高度在20~30 cm;大面积连片性好	整体近直立褶皱状,没有明显的方向	底部渐变;顶部参差不齐,突变为未变形层	退潮形成的波浪震荡剪切和上下起伏牵引	河口
滑动滑塌变形层理	规模很大,高度最大可达30~40 cm。垂向上叠置较少	呈不规则褶皱状,长轴和枢纽顺河流方向 典型的包卷层理。规则	底部渐变;顶部突变为滑动滑塌的脆性变形,包括滑塌角砾	上部沉积物滑动滑塌对液化面的强烈剪切	边滩、心滩和天然堤边缘
波浪作用变形层理	规模很小,高度多在3~5 cm	褶皱状,向斜宽阔,背斜尖窄。顺河道近连续条带分布	底部渐变,顶部突变为未变形层	波浪起伏形成的液化和密度倒置	边滩、心滩边缘靠河道
泄水变形层理	规模较大,高度多在20~30 cm	呈直立或近直立的管状,内部具有圈环构造	底面渐变,顶部不齐,突变为未变形层。孤立出现	波浪震荡液化形成密度倒置,形成泄水和底辟。	边滩、心滩内部
冰块拖移变形层理	规模较大或很大,大者长数米到数百米,宽数十厘米到一米多	表面平整的长条带状,顺河流分布,顺下游倾倒的褶皱状,横向为宽阔向斜状	底面渐变,顶部不齐,突变为未变形层	冰块在流水的牵引下沿软沉积物表面滑动形成的剪切扰动	边滩、心滩边缘靠河道
冰压刻变形层理	很小,高度多在数厘米	周缘凸起、中心向下的圆坑穴状或内部不规则变形层理	底部渐变,顶部突变为未变形层	冰层或冰块的向下的重力挤压	边滩、心滩内部
冰融塌陷变形层理	规模中等高度在10~20 cm	整体向下成不规则注状。大面积上呈不连续片状	顶底界面不齐,但均未变形	冰层或冰块融溶后其上的沉积物在重力的作用下向下挤压	边滩、心滩内部

塌和冰块滑动牵引形成的顺层剪切有关。形成软沉积物变形层理的作用力也可以归纳为两种:一是与横弯褶皱形成的应力相同的密度倒置,由波浪震动引起;二是与纵弯褶皱形成的应力相同的侧向作用力,顺层挤压或沿上下层面剪切。所以,与地震无关的软沉积物的变形动力和过程也是非常复杂的。简单总结认为,黄河下游和黄河三角洲分流河道上的变形层理以规模小、液化弱、垂向多层叠置和被极薄(数毫米)未变形层相隔为特点,可以与地震成因变形层理相区别。纵观黄河下游的变形层理,还会与滑动滑塌形成的断层伴生产出,这些断层经常会被后期的泥沙充填(甚至风成沙充填),形成砂泥脉,在古代岩层里这种组合也会呈现出地震成因的假象。但要密切关注变形层理本身的一些特点,尤其是堆叠变形层理之间的薄砂泥纹层的存在可以作为可靠的非地震成因

证据。最后需要强调的是包卷层理的成因与环境是多样性的,浊流仅是其中的一种,所以不能把这种层理作为浊流的指相构造。通过对现代非地震成因的变形层理和软沉积变形构造的研究,建立起辨识依据是识别古代地震与非地震的重要途径,应该受到重视。本研究还有许多问题还不明了,有待今后深入。

致谢 感谢共同参加野外考察的冷淑滨、吴孔友、李理、朱光有、朱明春、李勇(李俊廷);感谢审稿人的杰出工作;感谢编辑的辛勤劳动。感谢冯增昭教授的关心鼓励,他一直让我好好研究和总结 SSDS,尤其是非地震成因的 SSDS。另外,要非常感谢地科系马在平老师,是他把我领进了黄河现代沉积的研究大门。他多次带我考察黄河,寒暑无阻、任劳任怨。可惜天不假年,他因故英年早逝。每当我撰写黄河方面的论文时脑海里总浮现他的音容笑貌。借此机会向

天堂里的马在平老师致以深深谢意。

参考文献 (References)

- [1] Sims J D. Earthquake-induced structures in sediments of van Norman Lake, San Fernando, California[J]. *Science*, 1973, 182(4108): 161-163.
- [2] Seilacher A. Fault-graded beds interpreted as seismites[J]. *Sedimentology*, 1969, 13(1/2): 155-159.
- [3] 冯增昭, 鲍志东, 郑秀娟, 等. 中国软沉积物变形构造及地震岩研究简评[J]. *古地理学报*, 2017, 19(1): 7-12. [Feng Zengzhao, Bao Zhidong, Zheng Xiujuan, et al. Researches of soft-sediment deformation structures and seismites in China: A brief review [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2017, 19(1): 7-12.]
- [4] 苏德辰, 孙爱萍, 郑桂森, 等. 北京西山寒武系滑塌构造的初步研究[J]. *地质学报*, 2013, 87(8): 1067-1075. [Su Dechen, Sun Aiping, Zheng Guisen, et al. A preliminary research on the slump structures in Cambrian system in the western hills of Beijing[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(8): 1067-1075.]
- [5] 乔秀夫, 李海兵, 高林志. 华北地震旦纪—早古生代地震节律[J]. *地学前缘*, 1997, 4(3/4): 155-160. [Qiao Xiufu, Li Haibing, Gao Linzhi. Qiao X. Sinian-Early Paleozoic seismic rhythms on the North China platform[J]. *Earth Science Frontiers*, 1997, 4(3/4): 155-160.]
- [6] 杜远生, 余文超. 地震和非地震引发的软沉积物变形[J]. *古地理学报*, 2017, 19(1): 65-72. [Du Yuansheng, Yu Wenchao. Earthquake-caused and non-earthquake-caused soft-sediment deformations [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2017, 19(1): 65-72.]
- [7] 钟建华, 马在平. 黄河三角洲变形层理的研究[J]. *沉积学报*, 1998, 16(1): 45-51. [Zhong Jianhua, Ma Zaiping. Study on the deformation bedding in the delta of Yellow River[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(1): 45-51.]
- [8] 钟建华, 侯启军, 钟延秋. 黄河三角洲(泄水)包卷层理的成因研究[J]. *地质论评*, 1999, 45(3): 306-312. [Zhong Jianhua, Hou Qijun, Zhong Yanqiu. Genesis of the (Sluicing) convolute bedding in the Yellow River delta [J]. *Geological Review*, 1999, 45(3): 306-312.]
- [9] Zhong J H, Wen Z F, Wang G M, et al. Air-discharge pits on the Yellow River delta plain[J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 170(1/2): 1-20.
- [10] Zhong J H, Wang H Q, Yong L, et al. Ice-water pits upon the Yellow River delta plain[J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 187(1/2): 1-10.
- [11] Zhong J H, Ni L T, Sun N L, et al. A new unusual ice-induced sedimentary structure: the silt mushroom[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 36945.
- [12] Allen J R L, Banks N L. An interpretation and analysis of recumbent-folded deformed cross-bedding[J]. *Sedimentology*, 1972, 19(3/4): 257-284.
- [13] 钟建华, 李理. 黄河断流后三角洲(水上平原)的滑塌构造研究[J]. *沉积学报*, 2000, 18(1): 7-12. [Zhong Jianhua, Li Li. Study of the slump structure on the Yellow River delta during its in zero [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(1): 7-12.]
- [14] Molina J M, Alfaro P, Moretti M, et al. Soft-sediment deformation structures induced by cyclic stress of storm waves in tempestites (Miocene, Guadalquivir Basin, Spain) [J]. *Terra Nova*, 1998, 10(3): 145-150.
- [15] Alfaro P, Delgado J, Estévez A, et al. Liquefaction and fluidization structures in messinian storm deposits (Bajo Segura Basin, Betic Cordillera, Southern Spain) [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2002, 91(3): 505-513.
- [16] Pettijohn F J, Potter P E, Siever R. *Sand and sandstone*[M]. New York: Springer-Verlag, 1972.
- [17] Dzuynski S, Smith A J. Convolute lamination, its origin, preservation, and directional significance[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1963, 33(3): 616-627.
- [18] Collinson J D. *Sedimentary deformational structures*[M]//Maltman A J. *The geological deformation of sediments*. Dordrecht: Springer, 1994: 95-125.
- [19] Maltman A. *The geological deformation of sediments*[M]. Dordrecht: Springer, 1994.
- [20] Kotlia B S, Rawat K S. Soft sediment deformation structures in the Garbyang palaeolake: Evidence for the past shaking events in the Kumaun Tethys Himalaya [J]. *Current Science*, 2004, 87(3): 377-379.
- [21] Allen J R L. The possible mechanics of convolute lamination in graded sand beds[J]. *Journal of the Geological Society*, 1977, 134(1): 19-31.
- [22] Rossetti D F, Santos A E Jr. Events of sediment deformation and mass failure in Upper Cretaceous estuarine deposits (Cameté Basin, northern Brazil) as evidence for seismic activity[J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 161(1/2): 107-130.
- [23] Brett C E, McLaughlin P I, Cornell S R, et al. Comparative sequence stratigraphy of two classic Upper Ordovician successions, Trenton Shelf (New York-Ontario) and Lexington Platform (Kentucky-Ohio): implications for eustasy and local tectonism in eastern Laurentia [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 210(2/3/4): 295-329.
- [24] de Boer P L. Convolute lamination in modern sands of the estuary of the Oosterschelde, the Netherlands, formed as the result of entrapped air[J]. *Sedimentology*, 1979, 26(2): 283-294.
- [25] Owen G. *Deformation processes in unconsolidated sands*[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1987, 29(1): 11-24.
- [26] Wentworth C M, Wentworth C M. Dish structure, a primary sedimentary structure in coarse turbidites: Abstract[J]. *AAPG Bulletin*, 1967, 51(3): 485.
- [27] Rodríguez-Pascua M A, Calvo J P, De Vicente G, et al. Soft-sediment deformation structures interpreted as seismites in lacustrine sediments of the Prebetic Zone, SE Spain, and their potential use as indicators of earthquake magnitudes during the Late Miocene [J]. *Sedimentary Geology*, 2000, 135(1/2/3/4): 117-135.

- [28] Dalrymple R W. Wave-induced liquefaction: a modern example from the bay of fundy [J]. *Sedimentology*, 1979, 26(6): 835-844.
- [29] 钟建华,倪晋仁,宋维奇,等. 黄河三角洲上的冰成隆丘的研究[J]. *沉积学报*, 2001, 19(3): 357-362. [Zhong Jianhua, Ni Jinren, Song Weiqi, et al. Study on the ice-induced heaving in Yellow River delta [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(3): 357-362.]
- [30] 钟建华,王冠民,王夕宾,等. 黄河下游冰成滑塌与塌陷构造的研究[J]. *沉积学报*, 2002, 20(2): 261-266. [Zhong Jianhua, Wang Guanmin, Wang Xibin, et al. Study on the ice-induced slump and subsidence structures in the lower course of Yellow River [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(2): 261-266.]
- [31] 钟建华,王洪宝. 黄河下游河道的冻裂研究[J]. *沉积学报*, 2002, 20(4): 650-655. [Zhong Jianhua, Wang Hongbao. Study on the frozen cracks in the lower reaches of Yellow River [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(4): 650-655.]
- [32] 钟建华,倪良田,郝兵,等. 鄂尔多斯盆地白垩统大型类碟状构造的发现及其地质意义[J]. *古地理学报*, 2017, 19(1): 73-88. [Zhong Jianhua, Ni Liangtian, Hao Bing, et al. Discovery of large-scale dish-like structures of the Lower Cretaceous in Ordos Basin and its geological significance [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2017, 19(1): 73-88.]
- [33] 张昌民,王绪龙,尹太举,等. 新疆乌伦古湖冰滑痕特征及其形成机理[J]. *地质论评*, 2017, 63(1): 35-49. [Zhang Changmin, Wang Xulong, Yin Taiju, et al. Characteristics and formation mechanism of ice slide structures on the coast of Ulungur Lake, Xinjiang [J]. *Geological Review*, 2017, 63(1): 35-49.]

Modern Non-Seismically Induced Deformation Bedding in the Lower Reaches of the Yellow River and Yellow River Delta

ZHONG JianHua^{1,2}, SONG GuanXian¹, NI LiangTian¹, SUN NingLiang¹, HAO Bing¹, GE YuZhu¹, XUE ChunQi¹, SUN JingYao³, LIU Chuang¹, CAO MengChun¹

1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China

2. Laboratory of Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao, Shandong 266071, China

3. China National Offshore Oil Bohai Company, Tangshan, Hebei 063000, China

Abstract: Deformation bedding is a relatively common and important example of a particular type of soft sediment deformation structure (SSDS). These have recently been the research focus of various disciplines, such as sedimentology, engineering geology, seismology and structural geology. The main difficulty and problem at present concerns the recognition of seismic and non-seismic SSDS. A large number of studies have shown a considerable amount of deformation bedding in the lower reaches of the Yellow River, and there is strong evidence that it is by no means always the result of earthquake activity. The study of deformation bedding in detail is of importance for developing identification and division criteria between seismic and non-seismic SSDS.

There are many types of deformation bedding from different causes in the Yellow River and distributary channels: typical convolute bedding and very irregular general deformation bedding, whose origins include density or gravity inversion, or sliding caused by wave action, or water and sliding sediments traction, or even dragging or pressure carving by blocks of ice. Deformation bedding from different causes each has unique geometrical features that are useful as reliable markers of its genesis, and which may also be used as reliable criteria for recognizing its seismic (or non-seismic) origin. In addition to the complex hydrodynamic and climatic conditions of the lower Yellow River, the development of deformation bedding is mainly related to the extremely fine particle size of the sediments.

Key words: deformation bedding; convolute bedding; genesis; non-seismic; Yellow River