

文章编号: 1000-0550(2013)06-1008-06

基于驻波理论解释丘状交错层理^① ——以徐州地区贾园组风暴沉积为例

师庆民 冯乐 窦鲁星 刘绍莉 江煜波 孙晓倩

(中国矿业大学资源与地球科学学院 江苏徐州 221116)

摘要 丘状交错层理作为鉴别风暴沉积重要的标志之一,是最能反映风暴作用的沉积构造。本文基于驻波理论对丘状交错层理成因进行了新的解释,提出了丘状交错层理形成于驻波波节部位,形成丘状交错层理(或驻波)的动能近似恒定的观点。通过理论计算解释了丘状交错层理随水深变浅波长逐渐变长,波高逐渐减小,波长/波高逐渐增大的趋势,解释了徐州地区贾园组风暴沉积序列中丘状交错层理随水深的变化规律,从而验证了理论的可行性,对沉积环境具有一定的指示意义。

关键词 丘状交错层理 风暴沉积 驻波 波长 波高 贾园组 水深控制

第一作者简介 师庆民 男 1990年出生 硕士研究生 矿产普查与勘探 E-mail: shiqingmin_cumt@126.com

中图分类号 P531 **文献标志码** A

0 引言

丘状交错层理是风暴沉积序列中的组成单元,是风暴衰减到某一阶段大量碎屑物质堆积形成的似丘状的层理构造。丘状交错层理以其特有的构造特征成为鉴别风暴沉积的重要标志之一,对于研究风暴沉积的水深控制、古水流方向等具有重要的意义。因此,丘状交错层理自1975年被Harms提出^[1]后受到了广大研究工作者的重视。对于HCS(丘状交错层理)成因的论述,争论也颇多。Harms认为HCS反映了深部风暴波浪的活动性^[2],为HCS的形成提供了思路;Bourgeois认为绝大多数(即使不是全部)HCS的产生过程是沉积物覆盖于一个冲刷形成的丘状或槽状面上,形成所谓的侵蚀丘状层理^[3];张金亮等认为丘状交错层理是振荡水流或多向水流形成的^[4];赖志云等认为由于飓风带动水体形成涡流作用,在沉积物表面作螺旋式前进形成了丘状交错层理^[5]。一般认为,丘状交错层理是风暴浪摆动波和旋涡流控制下的发育产物^[6]综合了振荡水流和旋涡流两种观点。然而,上述观点不能很好的解释丘状交错层理平面呈规律性展布的特点。本文基于驻波理论较好的反演了HCS垂向和横向的演化过程。

1 HCS特征分析

HCS处于风暴沉积序列的第三单元(风暴沉积

序列自下而上依次为:滞积层段、平行层理段、丘状交错层理段、水平或微波状层理段、块状层理段),总体层面形态表现为由上凸或下凹,层理由一系列大型宽缓的波状层理组成。徐州赵圩地区贾园组丘状交错层理发育较普遍,在岩性上表现为含粉砂—粉砂质泥晶灰岩,为不明显的正粒序;纹层厚1~2mm;层系厚5~15mm,部分由于受侵蚀保存不完整或在顶部表现规律排列的同心纹状(图版I);波长、波高变化较大,波长/波高一般在10~15左右(图版I-B,C,D)。

2 HCS成因探讨

风暴事件可分为风暴前期、风暴增强期、风暴高潮期、风暴衰减期和风暴后期5个阶段^[7],在风暴增强期水动力不断增强,当达到松散堆积物的启动速度时泥沙被海水带起向岸一侧运动,在回流过程中海水又携带泥沙向离岸一侧运动。当风暴高潮期过后,能量不断衰减,风暴潮逐渐由高流态过渡为低流态,当水动力小于颗粒所受重力时,沉积物大量堆积,相继出现平行层理、丘状交错层理等。然而,在HCS成因方面一直没有统一的解释。

通过行波马达实验装置进行了水珠和干粉末在驻波振动体表面上的稳定分布,观察到水珠由于受附着力而处于波腹位置(图1),干粉末由于受碰撞冲击力处在波节位置^[8]。通过对泥沙在驻波条件下的沉

^①中国矿业大学大学生实践创新训练计划项目(编号: X1029011049)资助
收稿日期: 2012-03-22; 收修改稿日期: 2012-05-27

降规律的研究得出不同投放位置泥沙的沉降位置不同(图 2)。当 $0 < X_0/L < 0.12$ 时,泥沙先随波浪右移,到达河床 0.8 h 后又左移;当 $0.12 < X_0/L < 0.5$ 时,泥沙随波浪右移;当 $X_0/L > 0.5$ 时,沉降规律与前述类似,但方向相反,而投放在 X_0/L 为 0、0.5、1 的泥沙落地点相对投放点没有位移^[9]。即泥沙均向驻波稳定部位(波节)附近沉降。

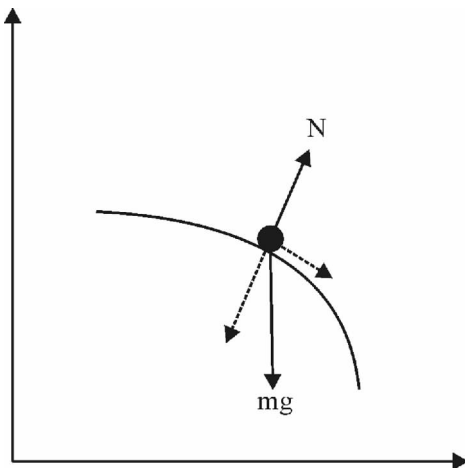


图 1 干粉在驻波表面的受力示意图
Fig. 1 Particle in the surface of the standing wave force diagram

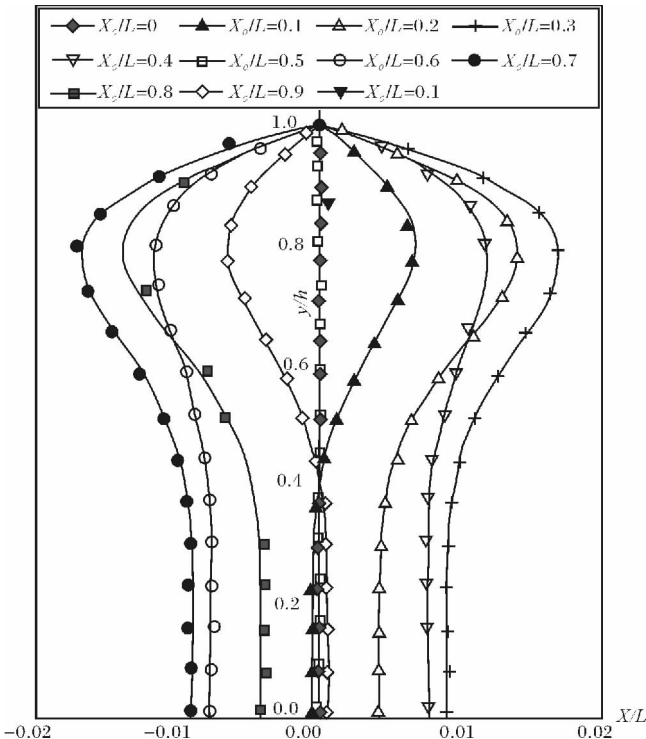


图 2 不同投放位置处泥沙的沉降轨迹(据文献[9])
Fig. 2 Different position of the sediment in settlement track (according to document [9])

笔者认为 HCS 是在水流波动的基础上形成的,是风暴衰减期的某阶段多向水流介质形成稳定驻波发育的产物,而驻波在水流中是普遍存在的。在风暴高潮期,形成的密度流以紊流的形式存在,沉积产物主要为砾状内碎屑灰岩;随着风暴潮的衰减,水介质由不稳定流逐渐向稳定流过渡,沉积产物主要表现为细砂质的平行层理;当水介质达到形成驻波的条件时,不同方向向岸水流与离岸水流叠加形成驻波,水质点不断向振幅最大的位置(即波腹)方向聚集,碎屑质点不断向不动点(即波节)方向聚集,由于波节位置水动能较弱,有利于碎屑物质在此堆积(图 3),碎屑沉积物在波腹位置堆积较少,形成薄层的洼地沉积物;在波节位置堆积较多,形成似丘状的沉积物。在风暴潮中驻波波长较长,波高较小,导致形成的纹层倾角较小。将风暴潮水流简化为一点的波源,而另一点为反射端,可得出同一深度丘状交错层理的横向展布图(图 4),其中实线与实线、虚线与虚线相交点表示波腹位置,虚实线相交点表示波节位置。在多向水流及复杂因素的影响下,丘状交错层理不一定表现出与波浪相同的波长与波高,但可以表示波长和波高及其比值总体的变化趋势。

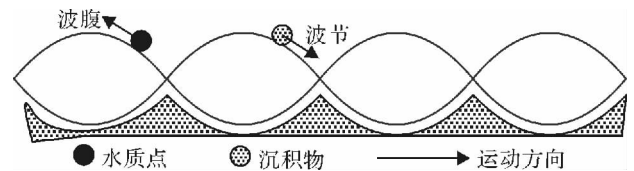


图 3 碎屑物在驻波中沉积示意图
Fig. 3 The sedimentary schemes of clastic materials in the standing wave

对驻波的形成存在较为严格的条件,即需要频率相同,振幅相同,传播方向相反。风暴浪水流在向岸波作用下向斜坡流动,在斜坡环境回流形成背岸波,由于近岸附近背岸水流能量损失较小,向岸波与背岸波叠加在斜坡附近形成驻波。无论在开放水域还是在封闭或半封闭水域,驻波的形成条件要求丘状交错层理只能发育在距斜坡较近的区域,尤其在斜坡较陡的深水区域易形成大型的丘状交错层理^[12]。在开放水域,驻波能量较大,波长、波高较大;在封闭或半封闭水域,驻波能量较小,波长、波高较小。

对于丘状交错层理的形成环境同样存在着不同的观点。最初认为 HCS 形成于正常浪基面和风暴浪基面之间^[10],但随着研究的深入,人们在很浅的环境下同样发现了 HCS,更有研究现代风暴理论的学者

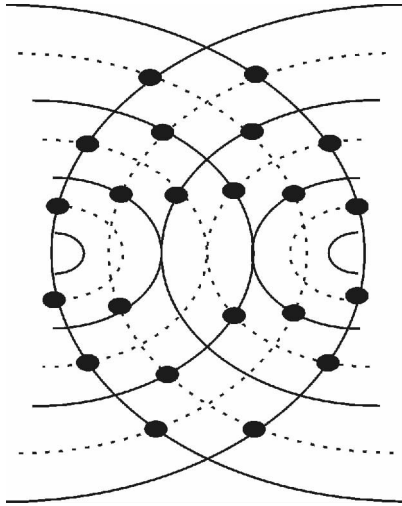


图4 HCS平面规律展布图

Fig. 4 The distribution of HCS in standing wave in plane

认为 HCS 仅保存在非常浅的风暴作用的无潮汐作用的滨海环境^[3]。笔者认为丘状交错层理的形成和保存受以下几种因素控制: (1) 风暴衰减到某阶段可以形成相对稳定的驻波, 只有在相对稳定的环境中才可能形成分布有序的丘状交错层理; (2) 持续时间的长短, 如果驻波持续时间较短则不足以使水介质中的悬浮物沉降下来形成丘状; (3) 沉积物源的丰富程度, 水介质中的悬浮物质是丘状交错层理的直接来源; (4) 风暴强度大, 则形成丘状交错层理规模较大; (5) 海平面正处于海退时期, 避免生物扰动对 HCS 的破坏作用; 浅水长期受波浪冲刷破坏的区域不利于 HCS 保存。

3 数理验证

风暴潮属于浅水波 ($d < 0.5\lambda$), 即这类波可以影响到海底^[11]。波速与深度以及波长与波速有如下关系:

$$\begin{cases} c = \sqrt{gd} & (1) \quad c\text{—波速}; g\text{—重力加速度}; d\text{—水深度}; \\ c = \lambda/T & (2) \quad \lambda\text{—波长}; T\text{—周期} \end{cases}$$

由此可以得出: $\lambda = T\sqrt{gd}$ (3), 即在同一时间波长随深度的增加而变长, 随深度变浅而缩短。根据能量公式 $E = \frac{1}{8}gH^2\lambda$ (4) H —波高, 与 (3) 式联立得 H

$$= \sqrt{\frac{8E}{gT\sqrt{gd}}} (5), \text{在同一时刻风暴潮能量保持不变,}$$

因此同一时间波高随深度的增加而变小, 随深度的变浅而增大。将 (3) 式与 (5) 式联立可得: $\frac{\lambda}{H} =$

$\sqrt[4]{\frac{T^6 g^5 d^3}{64E^2}}$ (6), 由此可知在同一时刻 λ/H 随水深增加而增大, 随水深变浅而减小。

但事实上, 丘状交错层理并没有表现出与风暴潮相同的特点, 即随水深的增加, λ 逐渐增大, H 逐渐变小, λ/H 逐渐增大。而是呈现出相反的特点。由此可见, 在同一期次的风暴中, 不同深度的丘状交错层理形成时间并不相同。原因在于丘状交错层理需要在特定的水流环境下形成, 只有风暴具有的能量降低到某一时刻水流达到驻波形成条件时才可形成丘状交错层理, 即 HCS 的形成具有相同的水动力条件或者动能。

将浅水波的水质点速度 $v = \frac{H\lambda}{2dT}$ (7) 与 (4)、(5)

式联立得到 $v = \frac{2E}{dT\sqrt{dg}}$ (8), 然后将 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ (9) 与

(8) 式联立得 $E_k = \frac{mE}{dT\sqrt{dg}}$ (10), 因此, 同一时刻波的

动能随水深的增加而变小, 随水深的变浅而增大, 由此可以看出, 丘状交错层理呈现由深水到浅水依次形成的趋势。

将 (4)、(10) 式联立, 可得 $E_k = \frac{gH^2}{8d}$ (11), 因此在 E_k 恒定的前提下, 波高 H 随水深的增加而增大, 随水深的变浅而减小。根据 $E_k = \frac{mE}{dT\sqrt{dg}}$, 由于 E_k 保持不变, 则 E 随水深变浅而减小, 因此频率 f 随之减小, 即周期 T 逐渐增大。根据 $\lambda = T\sqrt{gd}$, 波长 λ 逐渐变长, 反之, 随水深的增加, 波长 λ 逐渐缩小。也不难得出 λ/H 随水深的增加而变小, 随水深变浅而增大的结论。

4 理论应用

徐州赵圩地区贾园组风暴沉积序列中发育有良好的丘状交错层理。李壮福等将该区风暴沉积标志的组合划分为 6 种序列类型, 垂向上自下而上相互叠置, 分别对应风暴浪基面以下一潟湖的沉积环境^[12]。结合丘状交错层理波长、波高及其比值的变化规律, 可以很好的指示和验证风暴沉积标志组合类型的形成环境(表 1)。

徐州地区震旦系贾园组风暴沉积序列中丘状交错层理总体表现出 λ/H 随水深变浅而增大, 波长随水深变浅而逐渐变长的趋势, 仅有类型 VI 波长表现异

常。风暴浪潮在越过沙坝进入潟湖时损失能量较大,加之潟湖环境封闭局限导致风暴浪潮波长变短。

(6) 驻波理论对丘状交错层理的解释有利于探讨风暴沉积与水深控制之间的关系。

表 1 徐州地区震旦系贾园组风暴沉积类型及丘状交错层理特征

Table 1 The types of sedimentary sequence of storm and the features of hummocky cross-stratification in Jiayuan group of Sinian System in Xuzhou

类型	波长 λ/cm	波高 H/cm	λ/H	沉积环境
I		无丘状交错层理		风暴浪基面以下(陆棚)
II	20~40	3~4	7~10	风暴浪基面部位(陆棚)
III	40~90	4~10	9~10	正常浪基面处(陆棚边缘斜坡下部)
IV	50~100	4~9	10~15	(陆棚边缘斜坡上部)
V		保存不完整		浅海靠近滨海处
VI	30~50	2~4	11~15	潟湖

丘状交错层理波高变化规律不明显,主要原因在于:①根据 $E_k = \frac{\rho g H^2}{8d}$ 在动能一定的条件下,深度每增加一倍,波高仅增加 $\sqrt{2}$ 倍,可见波高本身变化比较缓慢;(HCS 波高受物源的控制,水介质中物源丰富则丘状交错层理可以更接近理想高度,物源缺少则实际波高离理想高度相差较大;(HCS 波高受驻波持续时间影响,持续时间足够长,则丘状交错层理可以达到理想高度,否则实际波高将小于理想高度;④受地形坡度的影响,当坡度较大时有利于驻波的形成和保持。

5 总结

丘状交错层理是研究风暴沉积最重要的标志,因此研究丘状交错层理具有重要的意义。本文依据驻波理论对丘状交错层理做了新的解释,现总结如下:

- (1) 丘状交错层理是风暴潮能量降低到某一阶段达到形成驻波的条件而形成的层理构造;
- (2) 丘状交错层理的形成具有相同的水动力条件或动能;
- (3) 丘状交错层理随水深的变浅表现出波长逐渐增大,波高逐渐变小,波长/波高逐渐变大的趋势;由于开放水域水动能大于封闭或半封闭水域,前者丘状交错层波长、波高及其比值明显高于后者;
- (4) 丘状交错层理形成于物源丰富、驻波稳定且持续时间较长的位置;
- (5) 大型的发育良好的丘状交错层理的保存条件要求风暴强度较大、海面处于海退时期,从而避免了生物扰动对丘状交错层的破坏;

参考文献 (References)

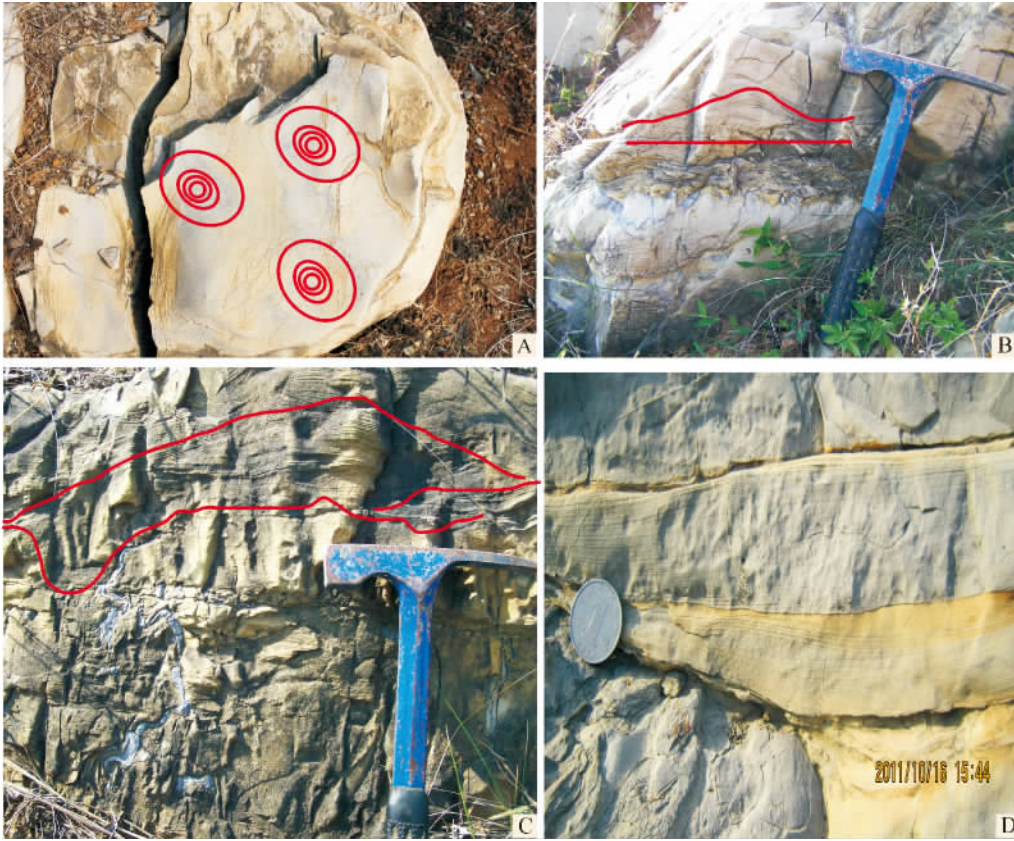
- 1 Harms J C. Stratification and sequence in prograding shoreline [C]. Deposits Sac. Econ. Paleontologists Mineralogists Short Course 2, 1975: 81-102
- 2 Harms M O, et al. Depositional environments as interpreter from primary sedimentary structure and stratificative sequene [C]. Soc. Econ. Paleotogists Mineralogists, short courses, 1975: 161
- 3 马永生,仲力. 风暴沉积、风暴岩的研究现状[J]. 地质科技情报, 1990, 9(3): 9-13 [Ma Yongsheng, Zhong Li. Recent development of study on storm deposition and tempestites [J]. Geological Science and Technology Information, 1990, 9(3): 9-13]
- 4 张金亮. 陆相储层沉积学进展[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996 [Zhang Jinliang. Development in Sedimentology of Contintal Clastic Rocks[J]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996]
- 5 赖志云, 赖伟庆. 丘状交错层理的成因探讨[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(5): 42-45 [Lai Zhiyun, Lai Weiqing. Study on the genesis of moudy cross-stratification [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(5): 42-45]
- 6 孟祥化, 乔秀夫, 葛铭. 华北古浅海碳酸盐岩风暴沉积河丁家滩相序模式[J]. 沉积学报, 1986, 4(2): 1-19 [Meng Xianghua, Qiao Xiufu, Ge Ming. Study on ancient shallow sea carbonate storm deposits (tempestites) in north china and Dingjiantan model of facies sequences [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1986, 4(2): 1-19]
- 7 张斌, 邓茂林, 税伟, 等. 风暴岩研究述评兼论兴文风暴研究的意义[J]. 四川地质学报, 2009, 29: 35-38 [Zhang Bin, Deng Maolin, Shui Wei, et al. A review of the study of tempestitie with special referenca to significance of tempestite in Xingwen county [J]. Acta Geologica Sichuan, 2009, 29: 35-38]
- 8 安宇, 周铁英, 刘呈贵. 水在驻波振动体表面上的分布[J]. 应用声学, 1996, 15(1): 5-8 [An Yu, Zhou Tieying, Liu Chenggui. The distribution of water drops on a standing wave vibrator surface [J]. Applied Acoustics, 1996, 15(1): 5-8]
- 9 肖洁. 泥沙在驻波条件下的沉降规律[J]. 水运工程, 2006, 7: 4-9 [Xiao Jie. Sedimentation law under stationary wave [J]. Port and Waterway Engineering, 2006, 7: 4-9]
- 10 Dot R H, Bourgeois J. Hummocky strtrigification: Significance of its variable [J]. Geological Society of America Bulletin, 1982, 90: 663-680
- 11 吕炳全. 海洋地质学概论[M]. 上海: 同济大学出版社, 2008 [Lü Bingquan. Marine Geology [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2008]
- 12 李壮福, 郭英海. 徐州地区震旦系贾园组的风暴沉积[J]. 古地理学报, 2000, 2(2): 19-27 [Li Zhuangfu, Guo Yinghai. Storm deposits in the Sinian Jiayuan Formation of Xuzhou area [J]. Journal of Palaeogeography, 2002, 2(2): 19-17]

Explaining Hummocky Cross-stratification Based on the Theory of Standing Wave: A case from Jiayuan Group storm deposits in Xuzhou

SHI Qing-min FENG Le DOU Lu-xing LIU Shao-li JIANG Yu-bo SUN Xiao-qian
(School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116)

Abstract: Hummocky cross-stratification, as one of the marks of the identification of storm deposits, can reflect the sedimentary structures of turmoil best. The paper, based on the standing wave theory to explain the origin of hummocky cross-stratification, has proposed the view of hummocky cross-stratification forming in the node and the kinetic energy of formation of hummocky cross-stratification or standing wave is approximately constant. Through calculation, explained that the wavelength is longer, the wave height is shorter and the wavelength/wave height is increasing. Explained the variation of hummocky cross-stratification in sedimentary sequence of storm in JiaYuan group of Xu Zhou area and verified the feasibility of the theory. This view is helpful to study the relationship between sedimentary sequence of storm and depth control.

Key words: hummocky cross-stratification; sedimentary sequence of storm; standing wave; wavelength; wave height; Jiayuan Group; depth control



图版 I 说明: A. HCS 平面同心纹层规律展布; B. 丘状交错层理 $\lambda = 20 \text{ cm}$, $H = 4 \text{ cm}$,下部为冲刷面; C. 丘状交错层理 粒度变粗(较图 2) $\lambda = 40 \text{ cm}$, $H = 4 \text{ cm}$; D. 丘状交错层理 泥质灰岩 $\lambda = 64 \text{ cm}$, $H = 4 \text{ cm}$