

黄岛金沙滩现代波痕沉积特征与水动力关系

杨俊生, 葛毓柱, 吴琼, 王晶, 王淼

中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580

摘要 黄岛金沙滩为典型的无障壁高能海岸, 后滨发育有风成波痕, 前滨滩槽和近滨上部可见大量浪成波痕。本文通过对上述3种环境下波痕的形态、沉积物粒度特征及前滨波痕形成水动力条件进行分析研究发现: 1) 后滨风成波痕波长、波高、迎流面及背流面相对浪成波痕较小, 但波痕指数较大, 而前滨滩槽、近滨上部波痕由陆向海波长、迎流面、背流面变小。2) 风成波痕沉积物粒度波峰较粗, 而浪成波痕沉积物粒度波谷较粗, 从前滨到后滨沉积物粗组分减少, 细组分增多; 风成波痕、前滨滩槽波痕粒度频率分布曲线呈“双峰”特征, 而近滨上部波痕粒度频率分布曲线主体呈“单峰”特征, 风成波痕、滩槽波痕沉积物缺少悬浮组分; 波痕沉积物分选-峰度图、分选-偏度图可以较好地判别沉积环境。3) 平均粒径与流速、水深、弗劳德数 Fr 有很好的线性关系, 前滨退潮时形成波痕的水动力条件具有水体浅、流速小和水动力弱的特点, 可能与退潮时流速、水深变化较快有关。4) 对前滨波痕沉积特征与相应流速、水深分别进行逐步回归分析, 获得了形成环境的流速、水深的回归关系式。

关键词 黄岛金沙滩; 波痕沉积特征; 水动力

中图分类号 P512.2

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.002

Characteristics of Ripples both in Morphology and Sediments in Golden Beach Coastal Zone, Huangdao and the Relationship with Hydrodynamics

YANG Junsheng, GE Yuzhu, WU Qiong, WANG Jing, WANG Miao

College of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

Abstract The Golden Beach is a typical high-energy coast without barrier, with wind ripples being developed in the backshore and wave ripples in the upside of the nearshore and swales in the foreshore. This paper analyzes the morphology, the sediment granularity and the hydrodynamic conditions of these three kinds of ripples developed in different environments, and it is found that, 1) The wind ripples in the backshore have a longer wavelength, a lower wave height, but a bigger ripple index as compared to the wave ripples. Both the wavelength and the scale of the wave ripples increase from the land to the sea. 2) For the wind ripples, it is the crest sediments that contain more coarse grains, while for the wave ripples, it is the valley sediments that contain more coarse grains, and the coarse grains increase their number from the backshore to the foreshore. The sediments of the wind ripples and the wave ripples in the swale lack the suspension components. The frequency distributions of the ripple grain size in the backshore and the foreshore take bimodal forms, while the frequency distribution of the ripple grain size in the upside of the nearshore takes a unimodal form. Using the sorting-kurtosis figure and the sorting-skewness figure of the ripple sediments, it is easy to distinguish the sedimentary environment. 3) The mean grain size of the sediments has a certain linear relationship with the flow velocity, the water depth and the Froude number Fr . According to the

收稿日期: 2013-06-07; 修回日期: 2013-11-27

基金项目: 教育部“国家级大学生创新创业训练计划”项目(111042502)

作者简介: 杨俊生, 副教授, 研究方向为沉积学与储层地质学, 电子信箱: sydxys@126.com; 葛毓柱(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为沉积学, 电子信箱: xiannizhike@163.com.

引用格式: 杨俊生, 葛毓柱, 吴琼, 等. 黄岛金沙滩现代波痕沉积特征与水动力关系[J]. 科技导报, 2014, 32(1): 22-29.

experimental results, the ripples in the foreshore formed in the falling tide indicate a weak hydrodynamic condition, which may be related to the quick change of the flow velocity and the water depth. 4) The regression equations between the sedimentary characteristics, the flow velocity and the water depth are obtained after the stepwise regression analyses.

Keywords Golden Beach coastal zone, Huangdao; sedimentary characteristic of ripples; hydrodynamics

波痕是一种常见的沉积构造,不同沉积环境下发育的波痕具有不同的形态特征和沉积物粒度特征,在沉积学中可以用来鉴别古沉积环境及其物理参数(水深、流速等)^[1]。前人对波痕的类型、成因以及波痕与沉积环境之间的关系做了大量的工作,基本上形成了一系列较为成熟的理论,出现了一些经典的研究,如Simons等^[2]通过水槽实验研究了水深、流速和底形之间的关系,Gaye等^[3]研究了底形与水流功率和粒度的关系,Allen等^[4]研究了波浪波痕稳定范围与接近沉积物表面的波浪诱发的最大流速和粒度的关系。但对于同一沉积环境不同微环境中波痕发育特征的研究较少。随着沉积学的发展,沉积环境的判别正在向量化、精细化发展,因此研究不同具体微环境中的波痕发育特征具有理论和实践意义。本文选取黄岛金沙滩这一典型无障碍高能海岸,对其不同微环境中波痕的发育特征进行深入研究,并对前滨海滩波痕及其水动力条件进行分析,希望对此类海岸微环境的判断、分析提供一定的参考和帮助。

1 区域地质概况

黄岛属鲁东丘陵区,呈西高东低之势,境内山峰有小珠山等,山岭之间发育多条河流。金沙滩位于黄岛开发区东南,南濒黄海,呈月牙形东南伸展,全长约3500 m,宽约300 m。水清滩平,沙细如粉,沙质为金黄色,属于基岩风化、改造作用形成的无障碍高能海岸,每天出现2次涨落潮,年平均高潮为3.5 m,年平均低潮为0.9 m。

2 沉积环境特征

金沙滩为无障碍高能海滩,根据水动力条件可分为后滨、前滨和近滨。浪成波痕主要发育于前滨滩槽和近滨上部,后滨发育有风成波痕,微相划分如图1所示。图1中①~④为采样带位置。

1) 后滨。位于最大高潮线之上,主要沉积物为风成沙,夹有大量贝壳碎屑。风成波痕发育,其形态和规模与风力有关,一般形态、规模较小,排列方向垂直风向,可能与海岸线平行,也可能斜交。波纹具平直、平行的波脊,有分叉,形状不对称,波长4~7 cm,波高约0.3~0.5 cm,波痕指数10~14,不对称度1~1.3。样品筛析中发现粗粒部分多为贝壳碎片,最细部分为黑色铁屑。

2) 前滨。可以细分为以下微沉积环境:(1)介壳滩。堆积有大量壳体碎片和砾石,且伴随有泡沫痕密集发育。(2)滩槽。回流波痕发育区,发育有舌状、新月形、链状、干涉等各种类型的波痕,成带状平行海岸线延伸,延伸差。观察发现

最初波痕形态、规模发育较完好且连续,经离岸流改造后,变得波痕形态多样,连续性差,且波痕由陆向海方向规模逐渐变小,不对称度变小,峰尖谷圆特征变得明显。波长9~18 cm,波高0.8~2 cm,波痕指数6~18,不对称度1~5。(3)滩脊。低角度缓坡,为冲浪所致,发育大型低角度交错层理和障碍痕、泡沫痕及各种生物痕迹,零星波痕为海水离岸流所成。

3) 前滨上部浅水带。位于水下,发育水下波痕,峰尖谷圆。波痕平行海岸线长距离延伸,且波脊平直,分叉较少,向海方向不对称度变小,波痕规模变得对称、一致。波长10~22 cm,波高0.9~2 cm,波痕指数6~19,不对称度1.2~2.7。

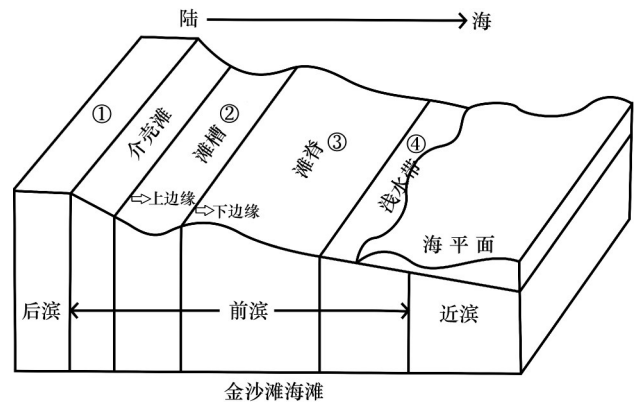


图1 海滩微相划分及采样位置示意

Fig. 1 Classification of beach micro facies and sampling location diagram

3 样品采集与处理

波痕发育区每一波痕分别在波峰处和波谷处采取两个样品。样品沙均为波痕表面沉积沙,直接与水体接触。现场记录各采样点所在波痕的发育密度、波高、波长。采样带位置如图1所示。

根据SY/T 5434—2009标准^[5],对所采样品进行粒度分析工作,具体操作如下:将烘干后的样品混合均匀,用电子天平精确称量50 g,置入电动筛分仪中筛分15 min,所用样品筛为18个,筛孔直径介于0.08~0.8 mm。得到样品粒度数据后,根据转换公式: $\Phi = -1.36 \lg D$ (D 为样品颗粒直径,mm),将样品颗粒直径大小转换为 Φ 值,以便后文作图 and 解释。然后,根据福克和沃德提出的粒度参数公式^[6]进一步计算出分选、偏度和峰度,分析所得实验数据如表1所示,表1中HB为后滨,TC为滩槽,TJ为滩脊,JB为近滨,样品号按由陆向海方向排列。

表1 样品分析数据
Table 1 Sample analysis data

样品号	波峰				波谷				波长/cm	波高/cm	迎流面/cm	背流面/cm	波痕指数	不对称度
	平均粒径/ Φ	分选	峰度	偏度	平均粒径/ Φ	分选	峰度	偏度						
HB-01	1.68	0.66	0.16	1.25	1.73	0.65	0.16	1.16	4	0.4	2.1	1.9	10	1.11
HB-02	1.69	0.54	0.06	1.02	1.77	0.57	0.00	1.03	4.3	0.4	2.2	2.1	10.75	1.05
HB-03	1.59	0.65	0.15	1.27	1.80	0.71	0.16	0.92	4.5	0.4	2.3	2.2	11.25	1.05
HB-04	1.49	0.58	0.12	1.24	1.69	0.63	0.16	1.09	5	0.5	2.6	2.4	10	1.08
HB-05	1.57	0.62	0.12	1.27	1.86	0.67	0.08	1.07	5.5	0.4	2.8	2.7	13.75	1.04
HB-06	1.56	0.58	0.05	1.05	1.75	0.60	0.04	0.94	6	0.4	3.5	2.5	15	1.4
HB-07	1.48	0.59	0.04	1.16	1.72	0.58	0.08	0.94	7	0.5	4	3	14	1.3
TC-08	1.48	0.67	0.96	-0.20	1.16	0.70	0.68	-0.04	18.00	1.20	15.00	3.00	11.20	5.00
TC-09	1.26	0.55	1.00	-0.01	1.49	0.62	1.03	-0.09	16.80	1.50	10.00	7.00	11.20	1.43
TC-10	1.80	0.58	0.95	-0.18	1.51	0.74	0.89	-0.14	16.67	1.70	10.00	8.00	9.80	1.25
TC-11	1.78	0.58	0.89	-0.17	1.55	0.65	1.02	-0.20	16.00	2.00	10.00	5.00	8.00	2.00
TC-12	1.69	0.63	1.20	-0.22	1.59	0.72	1.00	-0.24	15.00	1.10	8.00	7.00	13.64	1.14
TC-13	1.69	0.55	0.87	-0.11	1.57	0.65	1.02	-0.15	14.60	1.30	11.00	4.00	11.23	2.75
TC-14	1.95	0.45	1.12	-0.11	1.68	0.67	1.05	-0.29	14.00	1.60	8.00	4.00	8.75	2.00
TC-15	1.43	0.68	0.99	-0.18	1.64	0.64	1.11	-0.25	14.00	0.80	9.00	5.00	17.50	1.80
TC-16	1.85	0.61	0.98	-0.23	1.71	0.70	0.87	-0.24	12.00	1.40	7.00	5.00	8.57	1.40
TC-17	1.82	0.54	0.94	-0.14	1.77	0.68	0.97	-0.23	12.00	1.20	8.00	4.00	10.00	2.00
TC-18	1.55	0.65	1.10	-0.16	1.55	0.68	1.00	-0.22	12.00	1.00	7.00	5.00	12.00	1.40
TC-19	1.80	0.53	1.05	-0.11	1.66	0.51	1.17	-0.23	11.50	1.80	7.00	5.00	6.39	1.40
TC-20	1.72	0.55	0.87	-0.06	1.69	0.66	0.99	-0.19	11.00	1.40	7.00	4.00	7.86	1.75
TC-21	1.76	0.51	0.95	-0.13	1.75	0.61	0.86	-0.27	10.00	1.20	8.00	2.00	8.33	4.00
TC-22	2.02	0.48	1.06	-0.18	2.03	0.49	1.11	-0.18	10.00	1.10	6.00	4.00	9.09	1.50
TC-23	1.83	0.57	0.85	-0.18	1.82	0.64	0.98	-0.25	10.00	1.00	6.00	4.00	10.00	1.50
TC-24	1.56	0.61	0.98	-0.05	1.51	0.65	0.95	0.00	9.00	1.10	6.50	2.50	8.18	2.60
TJ-25	1.96	0.53	0.89	-0.17										
TJ-26	2.04	0.41	0.99	-0.12										
JB-27	2.33	0.37	1.05	-0.92	2.25	0.46	0.95	-0.34	19	1.5	11	8	12.67	1.38
JB-28	2.36	0.40	1.12	-0.43	2.21	0.45	0.99	-0.18	22	1.2	14	8	18.33	1.75
JB-29	2.21	0.31	-0.03	1.20	2.20	0.32	-0.05	1.17	16	1.7	11	5	9.41	2.2
JB-30	2.18	0.31	-0.02	1.26	2.23	0.30	-0.06	1.23	15	1.6	10	5	9.38	2
JB-31	2.13	0.32	0.03	1.11	2.17	0.32	-0.06	1.14	12	1.9	8	4	6.3	2
JB-32	2.19	0.31	-0.07	1.10	2.17	0.30	-0.04	1.16	10	0.8	6	4	12.5	1.5
JB-33	1.92	0.40	-0.02	0.94	1.91	0.43	-0.04	0.95	11	0.9	8	3	12.22	2.67
JB-34	1.91	0.41	-0.01	0.97	1.97	0.42	-0.06	0.96	11	1.4	6	5	7.86	1.2
JB-35	1.93	0.36	0.00	0.94	1.96	0.36	0.02	0.97	10	1.5	5.5	4.5	6.67	1.22

4 数据处理与分析

波痕形态特征及其沉积物粒度分析数据反映了波痕空间范围和内部粒度的分布和变化情况,是重要的沉积特征,对沉积环境有一定的指示意义。

4.1 波痕形态特征

由图2可以看出,后滨风成波痕形态规模较小;前滨、近滨上部向海方向波痕波长、迎流面及背流面水平长度逐渐减小;风成波痕波痕指数较大,而浪成波痕波痕指数较小。

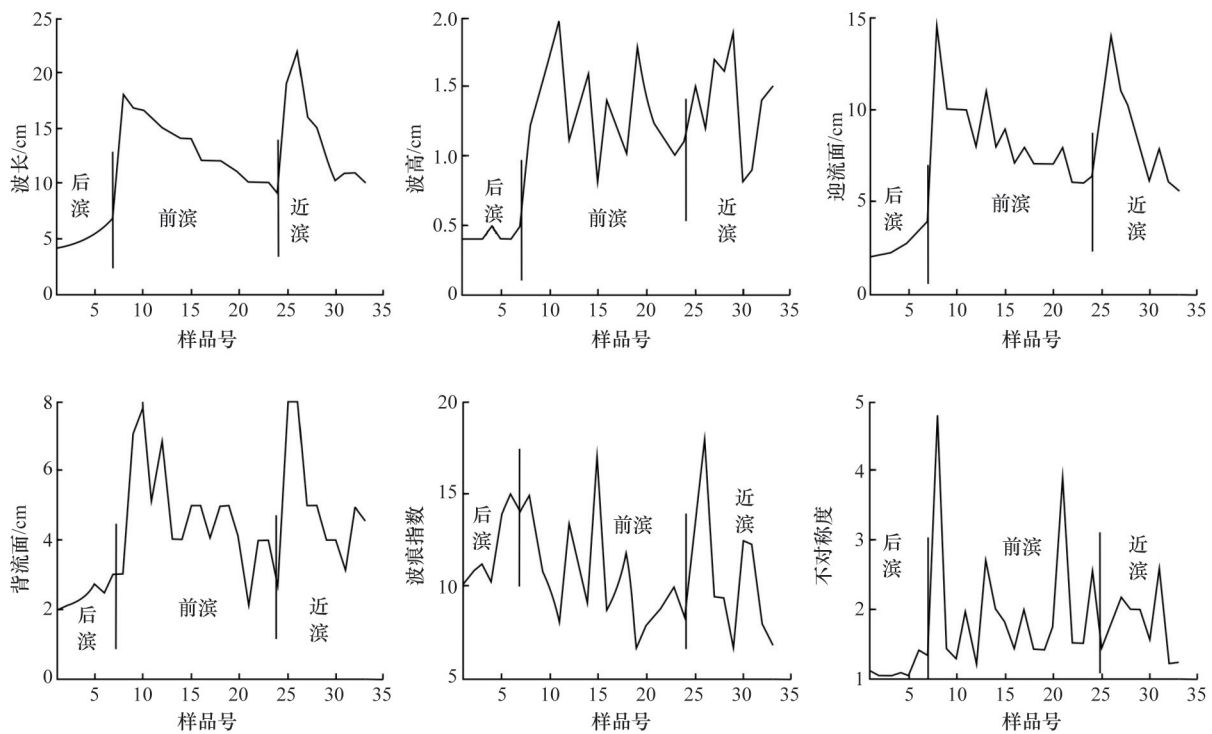


图2 金沙滩波痕形态特征(样品号同表1)

Fig. 2 Morphological characteristics of ripples on Golden Beach (Sample numbers are the same as in table 1)

4.2 波痕粒度特征

4.2.1 后滨、前滨滩槽、近滨上部粒度分布特征

后滨、滩槽处波痕沉积物粒度频率分布呈现“双峰”，峰值对应平均粒径值： $1.2\Phi(0.4\text{ mm})$ 和 $2.32\Phi(0.2\text{ mm})$ ，且滩槽处波痕沉积物粒度频率分布呈明显的“粗尾”特征；近滨上部沉积物粒度频率分布主体为“单峰”，峰值对应平均粒径值 $2.32\Phi(0.2\text{ mm})$ ；从近滨到前滨粗沉积物增多，细组分减少，平均粒径 Φ 值变大(图3)。图4表明风成波痕沉积物搬运方

式为滚动或跳跃，其概率累积曲线呈“两段”或“三段”式，滩槽和滩脊处沉积物搬运方式以滚动、跳跃为主，缺少悬浮组分，概率曲线呈“三段”式，受到冲刷-回流影响，近滨处沉积物悬浮组分增多，粗组分减少，以跳跃组分为主，受冲刷-回流影响小，累积概率曲线呈“四段”式，沉积物粒度累积概率曲线很好地解释了粒度频率分布曲线的“峰”的特征。(注：前滨滩脊处不发育波痕，故样品无波峰、波谷之分，此处用滩脊样品来较连贯地表明海滩沉积物的分布特征)。

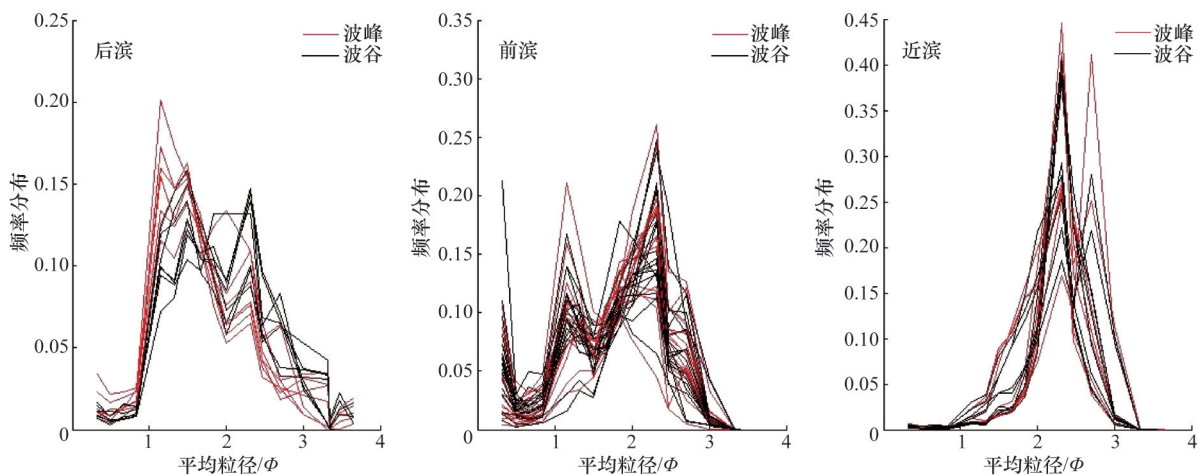


图3 后滨、前滨、近滨上部波痕粒度频率分布曲线

Fig. 3 Frequency distribution curves of ripple grain sizes in the backshore, foreshore and the upside of nearshore

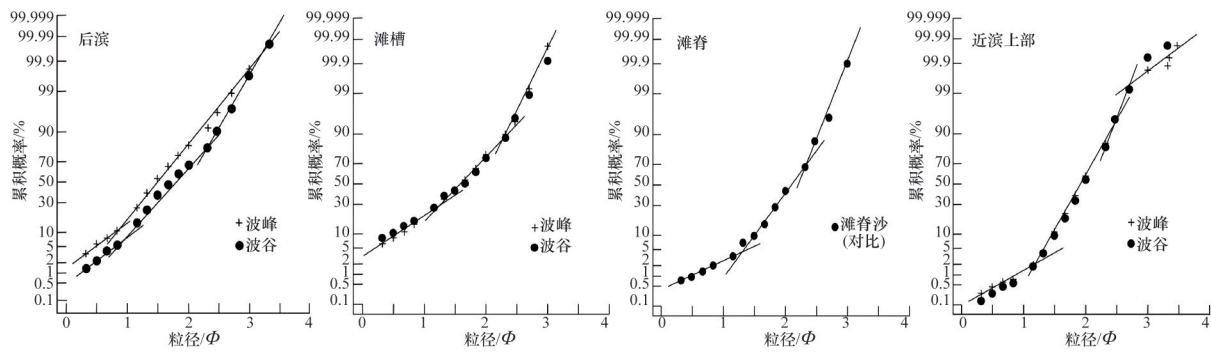


图4 后滨、前滨、近滨上部波痕粒度累积概率曲线

Fig. 4 Cumulative probability curves of the grain size in the backshore, foreshore and the upside of nearshore

4.2.2 后滨、前滨、近滨上部粒度参数特征

由图5可以看出,不同的沉积环境下沉积物粒度参数具有差异:

- 1) 平均粒径。后滨风成波痕波峰处沉积物较粗,而前滨和近滨上部波痕波谷沉积物较粗,且从前滨至近滨上部波痕沉积物粒度变细,风成波痕沉积物较粗是因为含较多壳屑。
- 2) 分选。不论是后滨波痕还是前滨、近滨上部的波痕,波峰处沉积物分选较好。近滨上部处波痕沉积物分选优于

后滨沙纹和前滨波痕沉积物的分选。

3) 峰度。各处沉积环境中波峰、波谷处沉积物峰度差别不大,但前滨处波痕沉积物峰度较大。

4) 偏度。波峰沉积物与波谷沉积物相比,波峰处偏度较大;前滨处波痕沉积物偏度值为负值,而后滨和近滨上部处为正值。

此外,波痕沉积物分选-峰度图、分选-偏度图^[7]表明,根据不同环境下沉积物粒度参数的差异,可以判别沉积环境,如图6、图7所示。

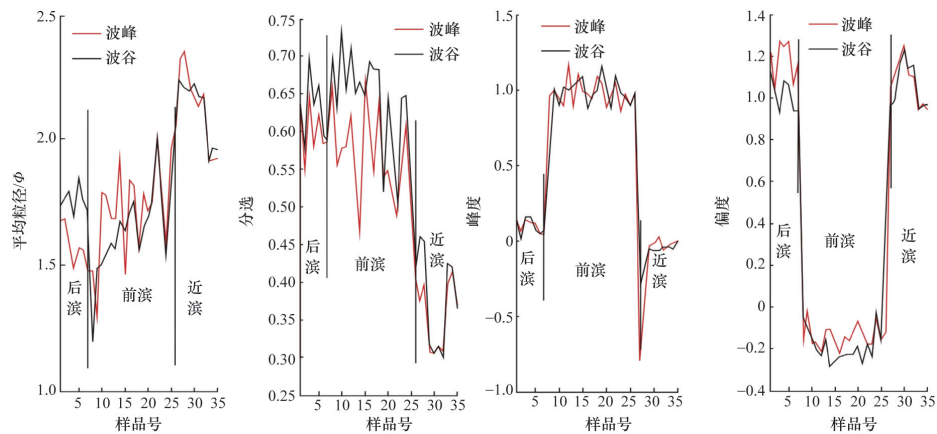


图5 后滨、前滨、近滨上部波痕粒度参数

Fig. 5 Graphs of ripple grain size parameters in the backshore, foreshore and the upside of nearshore

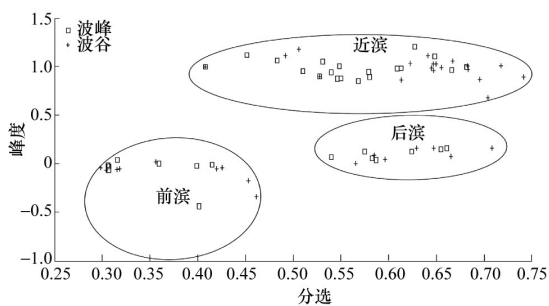


图6 不同沉积环境下波痕沉积物分选和峰度
Fig. 6 Sorting-kurtosis of ripple sediments in different sedimentary environments

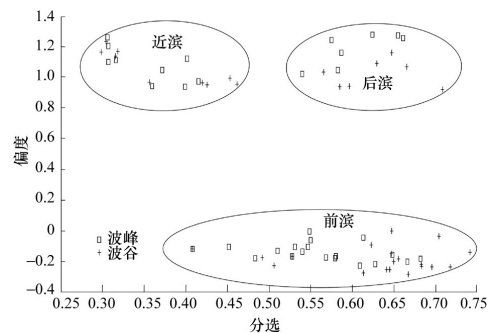


图7 不同沉积环境下波痕沉积物分选和偏度
Fig. 7 Sorting-skewness of ripple sediments in different sedimentary environments

4.3 前滨波痕特征与水动力关系探讨

采样过程中,在退潮时对前滨波痕发育处的流速、水深进行了测量,并计算出弗劳德数 Fr 。流速利用LS300-A型便

携式流速测算仪测量,水深利用塑料米尺测量。其与波峰、波谷处沉积物平均粒径关系如图8所示。

可见,平均粒径(波峰、波谷)与流速、水深、弗劳德数 Fr

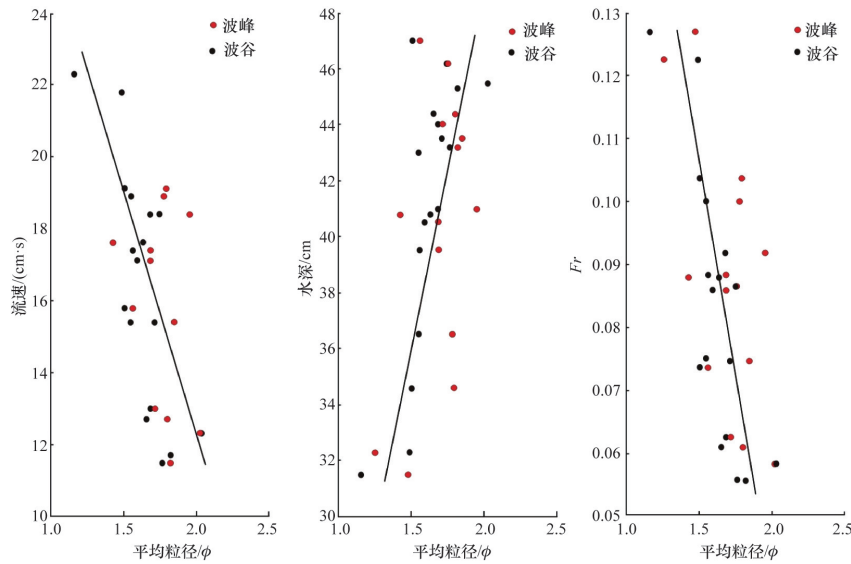


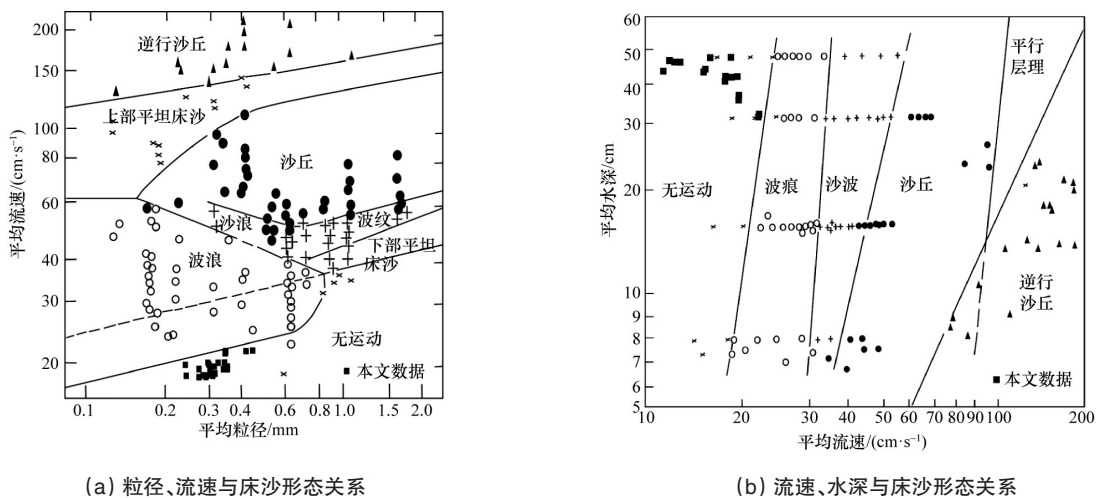
图8 平均粒径(波峰、波谷)与流速、水深、 Fr 关系图

Fig. 8 Relations between mean grain size(both in wave crest and wave trough) and flow velocity, water depth and Fr

有很好的线性关系。由实际观察可知,前滨浅水较深水处,退潮时流速较快,能量较大,沉积粒度较粗,与图5中前滨处沉积粒度变化相符。

前人或利用水槽实验,或对天然河流进行研究,建立了水深、流速、粒度、床沙形态、层理之间的关系^[3,8~10]。国内研究人员也进行了相关工作,如高健等^[10]通过现代河流滦河研究了波痕沉积物粒度、流速与层理之间的关系,冯兴雷^[12]、聂逢君^[11]等通过古代砂岩中波痕的物理参数对古水深和古水动力条件进行了分析。本文将从前滨环境中退潮时出现的滩槽波痕所获得的水深、流速、平均粒径、中值等数据投影在相关研究的成果图中,进行对比、分析。

图9(a)、(b)是根据水槽实验获得的成果^[3,13],图9(c)是由大量水槽实验和天然河流得出的成果^[9],其中沉积物的中值粒径分布范围为0.228~0.45 mm。图9(d)是现代河流(滦河)剖面分析获得的结果^[10],这里用于退潮时形成的海滩前滨波痕,可作为一种有益的对比和探讨。可以看出,图9(a)、(b)中,本文数据点投影在无床沙形态区域,与现实情况不同,而图9(c)、(d)中本文数据点分布于波痕区和小型槽状交错层理区,与现实情况相符。相较于前人水槽实验和天然河流分析的结果,海滩前滨退潮时形成波痕的水动力环境具有水深浅、流速小和水动力弱的特点。这可能与退潮时流速、水深变化较快有关,仍需进一步研究。

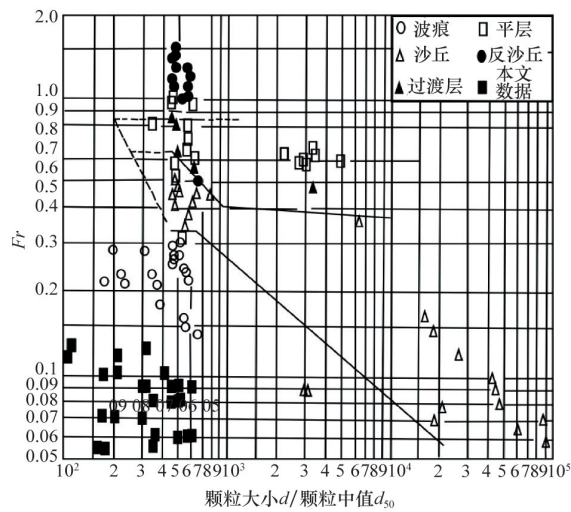


(a) 粒径、流速与床沙形态关系

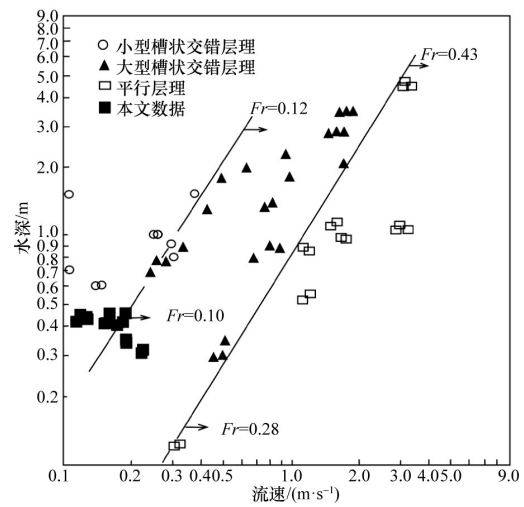
(b) 流速、水深与床沙形态关系

图9 水深、流速、粒度、床沙形态、层理关系

Fig. 9 Relations between flow velocity, water depth, grain size, bed morphology and stratification



(c) 流速、水深、粒度与床沙形态关系



(d) 流速、水深、粒度与层理关系

图9 水深、流速、粒度、床沙形态、层理关系(续)

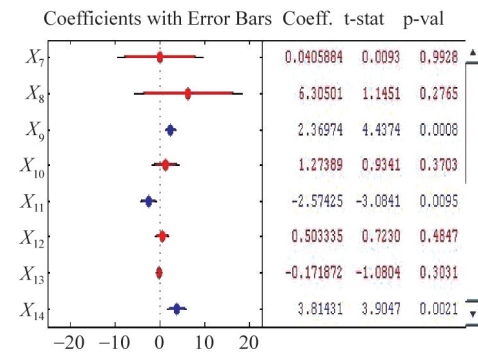
Fig. 9 Relations between flow velocity, water depth, grain size, bed morphology and stratification (continued)

4.4 水深、流速与前滨波痕沉积特征关系式探讨

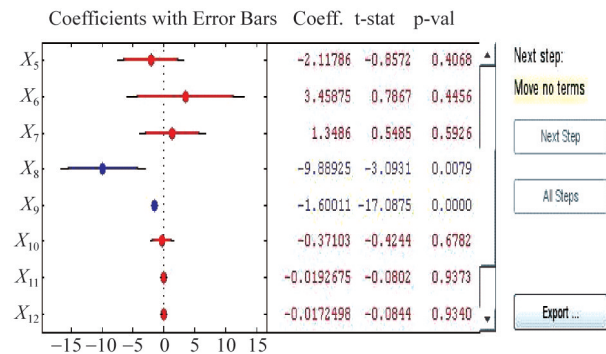
利用波痕形态和粒度特征分析,恢复其形成时的水动力,是一项很重要的工作。Allen、Homenwood、Diem等曾根据保存下来的古波痕沉积构造,对其形成环境进行了大量研究工作,得出了一系列公式用来判断当时沉积环境的物理参数^[4,14~16]。本文根据前滨现代波痕特征及其形成的水深、流速等资料,利用逐步回归分析方法对水深、流速与波痕形态特征和粒度特征之间的关系进行分析。

在多因子影响变量的分析中,逐步回归分析方法能够较

合理地选择对变量影响程度较大的因子,又可以减小计算量,其数学基本原理如下^[4,17,18]:已知影响因变量 y 的因子共有 m 个: x_1, x_2, \dots, x_m 。逐步回归的基本思想是:根据因子对因变量 y 的贡献大小逐步将因子引入;在引入因子的同时,又将作用不显著的因子剔除;这样边引入边剔除,直到最终获得较合理的回归因子。利用Matlab软件对流速、水深与波痕形态特征(波长、波高、迎流面、背流面、波痕指数、不对称度)及粒度特征(平均粒径、分选、偏度、峰度)之间的关系分别进行逐步回归分析,结果见图10。



(a) 流速逐步回归分析



(b) 水深逐步回归分析

图10 流速、水深与波痕特征逐步回归分析

Fig. 10 Stepwise regression analyses of both flow velocity and water depth

图10中, X_1 为波峰样品平均粒径 M_{d1} , Φ ; X_2 为波峰样品分选系数 σ_1 ; X_3 为波峰样品峰度 K_{c1} ; X_4 为波峰样品偏度 SK_1 ; X_5 为波谷样品平均粒径 M_{d2} , Φ ; X_6 为波谷样品分选系数 σ_2 ; X_7 为波谷样品峰度 K_{c2} ; X_8 为波谷样品偏度 SK_2 ; X_9 为波长 L , cm; X_{10} 为波高 H , cm; X_{11} 为迎流面水平长度 L_1 , cm; X_{12} 为背流面水平长度 L_2 , cm; X_{13} 为波痕指数 RI ; X_{14} 为不对称度 RSI 。由于软件

界面及图幅问题,图10(a)、10(b)未能显示全部数据($X_1 \sim X_{14}$),由于蓝色标志对应 X 值为影响流速、水深的显著因子,故重点将这些显著因子表现出来;可得, M_{d1} 、 L 、 RSI 与流速 V (cm/s)之间关系较强, SK_2 、 L 与水深 h (cm)之间关系较强。两处分析可得以下关系式:

$$h=60.1817-9.8892 SK_2-1.6001L$$

$$V=8.0074-5.1229M_{s1}+2.3697L-2.5742L_1+3.8143RSI$$

5 结论

1) 后滨风成波痕形态规模较小;前滨、近滨上部由陆向海方向波痕波长、迎流面、背流面逐渐减小;风成沙纹波痕指数较大,而浪成波痕波痕指数较小。利用这些形态特征可以对海滩不同部位发育的波痕进行区分。

2) 后滨、滩槽处波痕沉积物粒度频率分布曲线呈现“双峰”,且滩槽处波痕沉积物粒度频率分布曲线呈明显的“粗尾”特征,近滨上部沉积物粒度频率分布曲线主体为“单峰”;风成波痕概率累积曲线呈“两段”或“三段”式,滩槽和滩脊处沉积物概率曲线呈“三段”式,并受到回流影响,而近滨处沉积物受海水往复冲刷作用,累积概率曲线呈“四段”式。由前滨(滩槽、滩脊)、近滨上部波痕沉积物粒度频率分布曲线及累计概率曲线分析可得,从滩槽至近滨上部,粗粒组分减少,细粒组分增多,并且水动力状况和沉积物搬运形式发生差异性变化。

3) 不同环境下沉积物粒度参数存在差异,可以用来判别沉积环境。研究发现,利用沉积物的分选-峰度、分选-偏度关系可以很好地对后滨、前滨、近滨沉积环境进行判断。

4) 对前滨波痕沉积物及其水动力条件进行分析,发现平均粒径(波峰、波谷)与流速、水深、弗劳德数 Fr 有很好的线性关系。由观察及分析可得,前滨浅水较深水处,退潮时流速较快,能量较大,沉积粒度较粗。与前人水槽实验和天然河流实验结果对比发现,海滩前滨退潮时形成波痕的水动力环境具有水深浅、流速小和水动力弱的特点,这可能与退潮时流速、水深变化较快有关,总的来看两种环境下波痕形成水动力条件之间还是有一定的相似性,仍需进一步研究。

5) 利用 Matlab 软件对前滨波痕沉积特征(形态、粒度)与形成流速、水深分别进行逐步回归分析,可得波峰样品平均粒径 M_{s1} 、波长 L 、迎流面 L_1 、不对称度 RSI 与流速 V 之间关系较强,波谷样品偏度 SK_3 、波长 L 与水深 h 之间关系较强。所得回归关系仍需进一步实践验证。

参考文献(References)

- [1] 郑伟,齐永安,刘顺喜,等.河南云台山世界地质公园云梦山组波痕类型及其成因分析[J].河南理工大学学报:自然科学版,2008,27(4):399-404.
Zheng Wei, Qi Yong'an, Liu Shunxi, et al. Classification and genetic analysis of ripple marks on Yunmengshan Formation of Yuntai shan world geopark, Henan province[J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science Edition, 2008, 27(4): 399-404.
- [2] Simons D B, Richardson E V, Nordin C F. Sediment sorting in alluvial channels[M]//Middleton G V. Primary Sedimentary Structures and Their Hydrodynamic Interpretation, Special Publication No 12. Tulsa OK: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1965: 34-52.
- [3] Blatt H, Middleton G V, Murray R C. Origin of sedimentary rock[M]. 2nd ed. Englewood Cliffs, N J: Prentice-Hall, 1980: 782.
- [4] Allen P A. Reconstruction of ancient sea conditions with an example from the Swiss Molasse[J]. Marine Geology, 1984, 60(1-4): 455-473.
- [5] 国家能源局. 中华人民共和国石油天然气行业标准 SY/T 5434—2009

碎屑岩粒度分析方法[S]. 北京: 国家能源局, 2009.

National Energy Administration. Law of the People's Republic of Petroleum and Natural Gas Industry Standard, SY/T 5434—2009 Clastic rock grain size analysis methods[S]. Beijing: National Energy Administration, 2009.

- [6] Folk P I, Ward W D. Brazos Reviver bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1975(27): 3-26.
- [7] 肖晨曦,李志忠. 粒度分析及其在沉积学中应用研究[J]. 新疆师范大学学报:自然科学版,2006,25(3):118-123.
Xiao Chenxi, Li Zhizhong. The research summary of grain size analysis and its application in the sedimentation[J]. Journal of Xinjiang Normal University: Natural Sciences Edition, 2006, 25(3): 118-123.
- [8] 姜在兴,陈世悦,邱隆伟,等. 沉积学[M]. 北京:石油工业出版社,2003.
Jiang Zaixing, Chen Shiyue, Qiu Longwei, et al. Sedimentology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [9] Vanoni V A. Factors determining bed forms of alluvial streams[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1974, 100(3): 363-377.
- [10] 高健,严钦尚,许世远. 滦河中游现代河流沉积构造与水动力的关系[J]. 沉积学报,1983,1(1):27-41.
Gao Jian, Yan Qingshang, Xu Shiyuan. The relationship between sedimentary structures and hydrodynamic in the middle reach of the Luan River[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1983, 1(1): 27-41.
- [11] 冯迅雷,邓宏文,马立祥,等. 利用砂岩中波痕的物理参数分析沉积环境[J]. 沉积与特提斯地质,2010,30(3):53-57.
Feng Xinglei, Deng Hongwen, Ma Lixiang, et al. Applications of physical parameters for the ripple marks in sandstones to the analysis of sedimentary environments[J]. Deposition and Tethyan Geology, 2010, 30(3): 53-57.
- [12] 聂逢君,姜美珠,吴河勇,等. 利用砂岩中波痕的特征估算沉积环境的物理参数——以宣化地区长城系下部石英砂岩为例[J]. 沉积学报,2002,20(2):255-260.
Nie Fengjun, Jiang Meizhu, Wu Heyong, et al. Estimates of physical parameters in sedimentary environments by means of ancient ripple marks—case of changchengian quartz sandstones in Xuanhua Area, northwest Hebei[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(2): 255-260.
- [13] Harms J C, Southard J B, Spearing D R, et al. Depositional environments as interpreted from primary sedimentary structures and sequences[M]. Dallas, TX: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1975: 161.
- [14] 周丽清,姜在兴,林承焰,等. 黄河下游的河浪作用及波痕特征[J]. 石油大学学报:自然科学版,1991,15(6):22-27.
Zhou Liqing, Jiang Zaixing, Lin Chengyan, et al. Fluviovave and ripple mark characteristics in lower reach of Yellow River[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 1991, 15(6): 22-27.
- [15] Homewood P, Allen P A. Wave-tide and current-controlled sandbodies of miocene molasse, western Switzerland[J]. Bulletin of American Association of Petroleum Geologists, 1981, 65(12): 2534-2545.
- [16] Diem B. Analytical method for estimating palaeowave climate and water depth from wave ripple marks[J]. Sedimentology, 1985, 32: 705-720.
- [17] 王清河,常兆光,李荣华. 随机数据处理方法[M]. 3版. 北京:中国石油大学出版社,2005.
Wang Qinghe, Chang Zhaoguang, Li Ronghua. Random data processing method[M]. 3th ed. Beijing: China Petroleum University Press, 2005.
- [18] 刘仁云. 数学建模方法与数学实验[M]. 1版. 北京:中国水利水电出版社,2011.
Liu Renyun. Mathematical modeling methods and mathematical experiments[M]. 1st ed. Beijing: China WaterPower Press, 2011.

(责任编辑 侯澄芝,马宇红)