

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019060701

基于地统计学的粒径输运趋势分析在滦河水下三角洲的应用

于晓晓^{1,2,3}, 谷东起³, 闫文文³, 孙惠凤³, 李平³, 张志卫³, 瞿洪宝⁴

1. 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061

4. 海南省海洋地质调查研究院, 海口 570206

摘要:利用均匀分布于滦河水下三角洲的85个表层沉积物粒度数据,基于地统计学的粒径输运趋势方法对滦河水下三角洲沉积物的输运趋势及影响因素进行了研究。半方差函数分析表明,以 0.015° (地球大圆弧度)为插值半径加密后(规则分布)的平均粒径半方差值具有随变程增加而增加的趋势,并在变程值达到 0.09° 后趋于稳定,而原始数据的半方差值与变程相关性较差。以此(0.09°)为特征距离计算的粒径输运结果显示,滦河水下三角洲南部水深12 m以浅区域粒径输运趋势以向南为主,北部具有向西和向北的趋势;水深12~15 m范围内粒径输运趋势近似西南方向,且趋势较大;南部水深15 m以深地区粒径输运趋势方向为西北向,北部为东南向。粒径输运趋势整体上与实测潮流、余流和泥沙输运方向一致,显示潮流对研究区沉积物的输运具有控制作用。滦河水下三角洲地区沉积环境和输运趋势受河流、波浪、潮流、残留沉积和地形等多种因素影响,粒径输运趋势仅能够较好地解释潮流影响,对于残留沉积等复杂沉积过程的解释则相对有限。

关键词:地统计学; 粒径输运趋势; 特征距离; 潮流; 滦河水下三角洲

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

Application of geostatistical grain size trend analysis in the Luanhe River Subaqueous Delta

YU Xiaoxiao^{1,2,3}, GU Dongqi³, YAN Wenwen³, SUN Hui Feng³, LI Ping³, ZHANG Zhiwei³, QU Hongbao⁴

1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, Qingdao 266071, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. First Institute of Oceanology, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

4. Marine Geological Survey Institute of Hainan Province, Haikou 570206, China

Abstract: With the grain size data of 85 surface sediment samples collected from the Luanhe River Subaqueous Delta (LRSD), we studied the sediment transportation trend using the geostatistical grain size trend analysis method (GSTA) in this paper. It is revealed that the semi-variance value of mean grain size in a regular grid increases with distance until the distance reaches 0.09 decimal degree, while the irregular data shows no such a correlation with distance. Thus, the decimal degree of 0.09 is chosen as the character distance for grain size trend analysis. It is further revealed that the direction of the semi-variance is 55° , which is parallel to the tidal current, suggesting that the character distance is tide related. Geostatistical GSTA result further indicates that the net sediment transport trend direction in the south area, where the water depth is less than 12 m, is in southwest, whereas that in the north area, where the depth is less than 12 m, is in west and southwest directions. In the area with water depth between 12 and 15 m, the net sediment transport trend is in southwestern direction, roughly parallel to the coast line. In the area under water depth more than 15 m, the net sediment transport trend is northwest in direction in the southern part, but southeast direction in the northern part. The grain size net sediment transport trends mentioned above are similar to the field measured tidal current, residual current, and sediment transport directions suggesting a tide predominated sediment transportation. However, relict sediments, wave, river and bedform are more complex, which may give influences the grain size net sediment transport trend. The research results of the net sediment transport trend in LRSD may reveal the influence of tidal current. However, for an explanation to relict sediments, further researches are required.

Key words: geostatistics; grain size trend; characteristic distance; tidal current; Luanhe River Subaqueous Delta

资助项目: 国家自然科学基金-山东联合基金重点支持项目“黄河三角洲地貌演变的动力机制与环境效应”(U1706214)

作者简介: 于晓晓(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事海岸带沉积学研究, E-mail: m13964802563@163.com

通讯作者: 谷东起(1971—), 男, 研究员, 主要从事海岸带环境演化与人类活动响应研究, E-mail: friendgu@fio.org.cn

收稿日期: 2019-06-07; 改回日期: 2019-09-04. 文凤英编辑

沉积物粒径输运趋势分析能够推断沉积物运移, 并且具有经济便捷的特点^[1]。McCave^[2]于 1978 年最早定义了粒径趋势(粒径参数的平面差异), McLaren^[3]于 1981 年提出了基于沉积物粒径参数的沉积物输运概念模型^[4]。McLaren 和 Bowles^[4]在水槽实验和统计计算基础上, 对输运过程中的沉积物粒径参数(平均粒径、分选系数和偏态)组合进行了研究, 并认为 FB-和 CB+两种类型在净输运方向上出现的频率最高。

Gao 和 Collins^[5]提出了 Gao-Collins 模型, 并被广泛应用于海湾^[5-7]、海滩^[8-11]、河口^[12-14]、陆架^[15-16]等多种海洋沉积环境中。其中, 该方法中最为关键的参数就是特征距离(D_{cr})^[17]。该参数在之前的研究中通常选择最大采样间距^[18-20]或者最大采样间距的 1.4 倍^[15], 然而该定义并没有明确的物理意义^[21]。基于地统计学计算的特征距离则能够与明确的物理现象相对应, 可以有效地限制采样间距选择, 进而降低粒度趋势图像的噪声^[22]。

本文基于 2014 年秋季在滦河水下三角洲采集的 85 个表层沉积物粒度数据, 利用基于地统计学的粒径输运趋势模型, 对粒径输运趋势模型在滦河水下三角洲的应用进行了示例和验证, 并进一步分析了滦河水下三角洲地区的沉积环境及影响因素。

1 研究区概况

滦河发源于燕山西部的巴彥屯古尔山, 流经坝上草原, 并向东横切燕山南部, 在迁安市西南部冲出燕山, 形成了广阔的滦河冲积扇-三角洲体系^[23-25]。现代滦河三角洲位于河北省秦皇岛市昌黎县与唐山市乐亭县交界处, 是滦河于 1915 年冲决七里海八爷铺沙丘而形成的年轻三角洲体^[23-25]。现代滦河三角洲呈扇形, 粗颗粒的沙质沉积在波浪的作用下, 形成了一系列围绕三角洲分布的滨岸沙坝(图 1), 沙坝内部分布潟湖, 潟湖与主河道以岔道相连接, 岔道仅在洪季有水流, 其余时间均受潮流作用^[26]。现代滦河三角洲地区受北部秦皇岛无潮点影响, 潮差仅 0.74 m, 属弱潮型三角洲^[27]。

滦河全长 887 km, 流域面积 44 880 km², 1979 年之前年均径流量 47.2×10⁸ m³, 年均输沙量 22.2×10⁶ t^[27-29]。滦河年均径流量、输沙量与年内径流量、输沙量均具有较大的变化(图 2), 并且输沙量年际变化大于径流量年际变化^[26]。径流量与输沙量主要集中于夏季, 其中夏季输沙量可达年输沙量的 95%。

1979 年, 滦河中上游建设了潘家口和大黑汀水

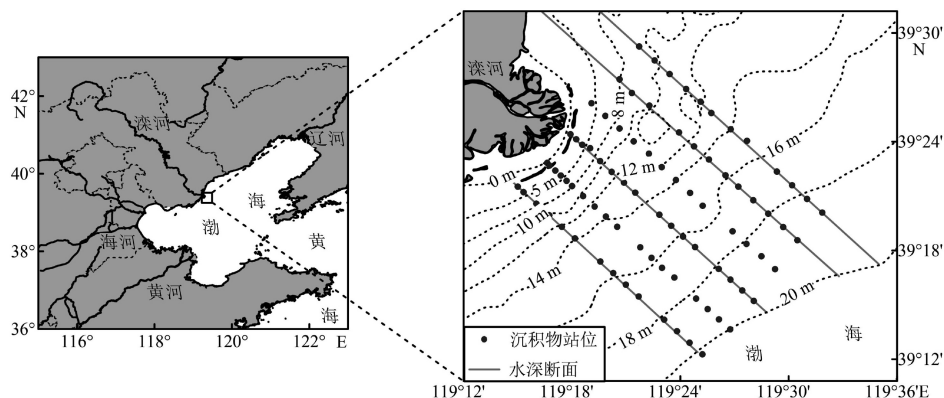


图 1 现代滦河三角洲位置及表层沉积物取样站位

Fig.1 Locations of the LRS and surface sediment sampling stations in the study area

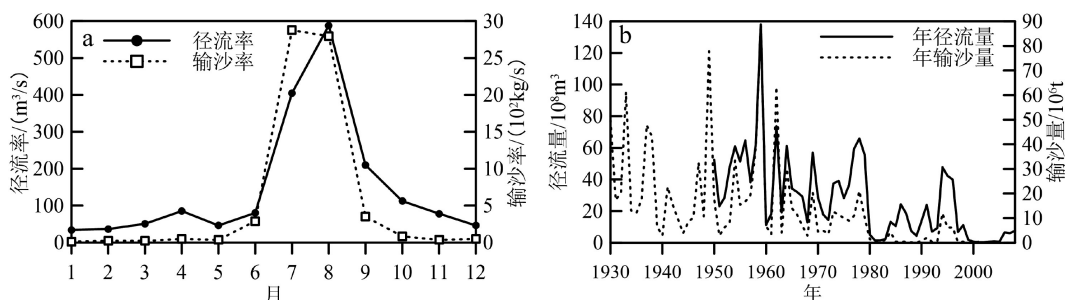


图 2 滦河年内径流率、输沙率 (a) 与年际径流量、输沙量 (b)

Fig.2 Monthly water discharge rate and sediment load rate (a) and annual water discharge and sediment load (b) of the Luanhe River

库,加之引滦入津和引滦入唐等工程施工,滦河径流量与输沙量在1979年之后持续下降,并于2000年后进入常年断流状态^[29]。受滦河输沙量降低的影响,现代滦河三角洲在波浪、潮流及人类活动影响之下,进入持续退蚀状态,多年遥感影像显示部分地区退蚀速率超过30 m/a^[29]。

2 方法

2.1 样品采集

2014年10月,利用小型箱式取样器在滦河水下三角洲取得85个表层沉积物样品,取样水深基本在20 m以内(图1)。定位设备采用HD5800N-RTK实时动态差分GPS定位仪,平面定位精度优于50 cm。样品取得后即封存于样品袋,并带回实验室处理。

2.2 室内测试

粒度测试工作在自然资源部第一海洋研究所海洋沉积与环境实验室完成。首先,选取约2~5 g样品于塑料试管中,分别加入15 mL蒸馏水、15 mL 30%的 H_2O_2 和2 mL 1%的 $NaPO_3$,静置12 h后加热以快速去除有机质;之后,加入5 mL 5%盐酸,并静置12 h以除去钙质。最后,对样品进行三次离心洗盐处理。预处理之后的样品进行上机测试,每个样品至少测量两次,两次测量的中值粒径差值不超过3%。粒径采用等比制粒度中的 Φ 标准,利用McManus矩法^[30]计算。

2.3 基于地统计学的粒径净输运趋势分析

地统计学粒径净输运趋势分析需要对数据进行等间距插值、归一化、特征距离计算、输运趋势选择及显著性检验等处理步骤^[17-19,22]。(1)首先对实验室测试后获得的沉积物粒径参数进行平面插值加密处理,并获得数学意义上的等间隔分布的沉积物站位,再利用Wilcoxon符号秩检验来检验不同粒径参数及插值半径在插值前与插值后数据的差异。(2)分析插值后的沉积物粒径参数的空间变异,计算插值半径与协方差函数关系,并选择合适的特征距离。(3)选择目标粒径净输运趋势,即CB+或/和FB-。(4)基于Gao和Collins模式^[18-19],计算粒径净输运趋势。(5)利用Global Moran's I空间统计来检验粒径输运趋势结果的空间自相关性^[31],对所计算的粒径输运趋势进行判别^[32]。

2.4 粒度组分分离

粒度组分总体是单组分的自然累积,因而总体分布函数在数学上可以表示为组分原型函数与其百分比乘积之和^[33]。Weibull分布函数具有形状和位置参数,相较正态分布、Poisson分布、 γ 分布、F分布和T分布等函数具有更大的自由度^[34-35]。根据研究区获得的85个样品,在 $-0.125 \sim 11.500 \Phi$ 之间获得47个粒径区间,利用Weibull函数进行粒度组分分离。

3 结果

3.1 粒径参数平面分布

滦河三角洲表层沉积物平均粒径范围为 $1.46 \sim 6.91 \Phi$,平均值为 4.05Φ 。分选系数范围为 $0.39 \sim 2.96$,平均值为1.92。偏态值范围为 $-1.62 \sim 2.74$,平均值为1.48,以正偏为主。峰态值范围为 $0.50 \sim 3.50$,平均值为2.46。表层沉积物粒径参数平面分布(图3)显示,南部滨岸沙坝和正对河口地区存在砂质沉积区,分选系数指示砂质沉积区沉积物分选良好,基本没有泥质沉积。沉积物在15 m等深线以浅较粗,仅在西侧存在一舌型泥质沉积中心,段晓勇等^[36]、刘金庆等^[37]也报道了类似的趋势。15 m以深基本为泥质沉积,分选较差,偏态和峰态值均较高。

3.2 基于地统计学的粒径输运趋势分析

为获得规则(等间距)分布的站位(图4),本文对原始沉积物粒径参数进行了等间距插值和重采样,为防止由于插值所引入的新“噪声”对粒径净输运趋势分析产生影响,利用Wilcoxon符号秩检验对插值前后的数据差异进行了检验(表1)。结果表明,以 0.016° 和 0.015° 为插值半径的插值结果均满足Wilcoxon符号秩检验,表明插值前后数据差异较小,而以 0.014° 为插值半径的插值结果与原始数据差异较大,不满足实验条件。因此,本文选择的插值半径为 0.015° ,等间距插值之后的规则站位分布见图4c。

对原始数据与规则数据的平均粒径分别进行地统计学的半方差计算(图4b、d)。结果表明,原始数据的半方差值随着距离的增加变化较为随机(图4b);相反,规则数据的半方差值则随着距离的增加而增加,并且在达到约1.14后趋于相对稳定(图4d),其对应的变程值为 0.09° ,即研究区内沉积

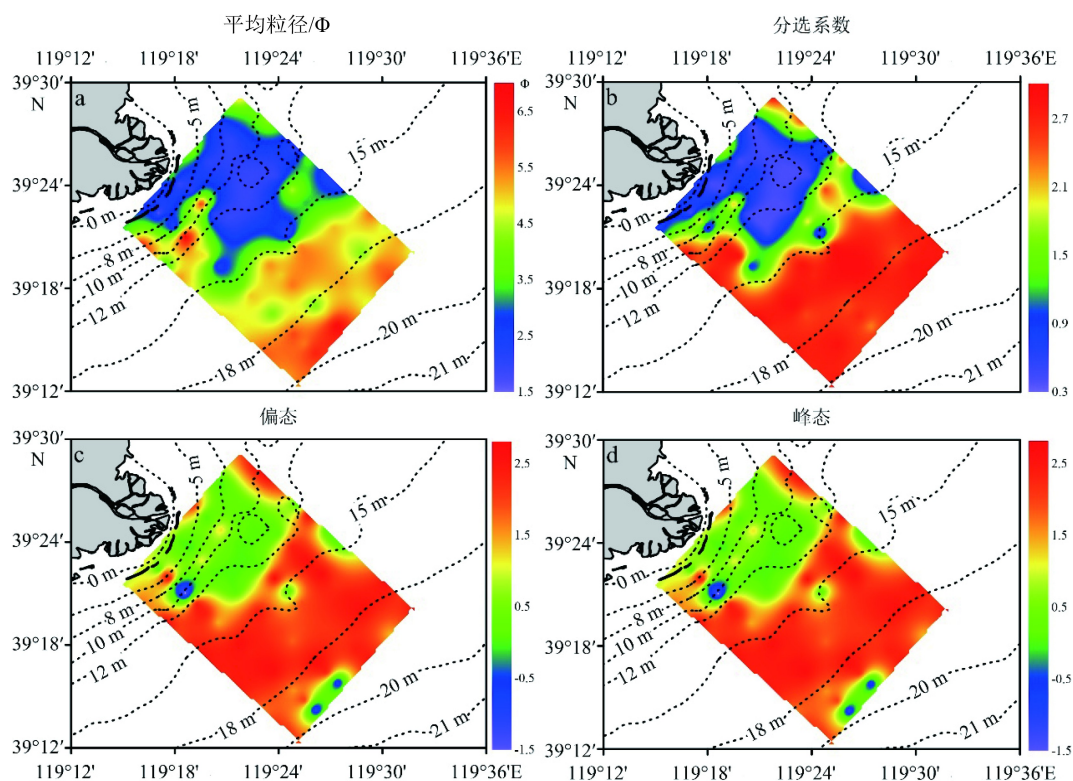


图 3 滦河三角洲表层沉积物粒径平面分布

Fig.3 Spatial distribution of grain size parameters of the surface sediment samples collected from the LRSD

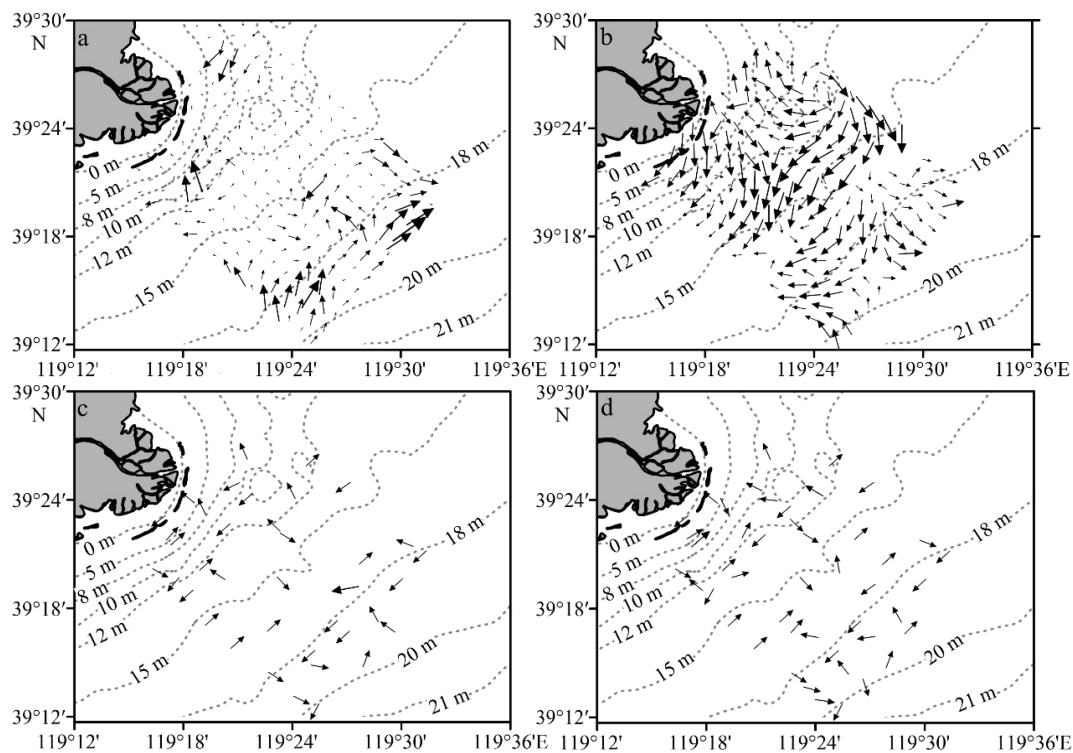


图 4 原始 (a、b)、规则 (c、d) 沉积物站位分布与半方差函数

Fig.4 Sampling locations and semi-variances for the irregular (a, b) and regular grids (c, d)

物平均粒径的各向同性变程为 0.09° , 具有明显的自相关性^[38]。 0.09° 等于插值后的 6 倍样品间距 (0.015°), 表明滦河水下三角洲沉积物平均粒径平

面上具有方向性, 其方向是 55° , 与涨落潮流方向近似平行^[39]。因此, 我们将 0.09° 作为地统计学粒径趋势分析的特征距离, 其可能与潮流作用有关。

表 1 粒径参数的 Wilcoxon 符号秩检验 ($\alpha=0.99$)
Table 1 Wilcoxon non-parameter test for the grain size parameters ($\alpha=0.99$)

插值半径/ (°)	粒径参数	P 值	h
0.016	平均粒径	1	0
	分选系数	1	0
	偏态	1	0
0.015	平均粒径	1	0
	分选系数	1	0
	偏态	1	0
0.014	平均粒径	0.801	1
	分选系数	0.801	1
	偏态	0.801	1

以 0.09°为特征距离,对规则分布的粒径特征进行粒径输运趋势分析后,得到了 CB+(图 5a)和 FB-(图 5b)两种模式的沉积物输运趋势,同时计算了原始数据的 FB-模式(以最大间隔距离 0.042°为特征距

离)的粒径净输运趋势(图 5c)和相同模式下 1.4 倍最大间隔距离 (0.059°,图 5d)的粒径净输运趋势(图 5d)。

图 5c、d 显示,两者粒径输运趋势基本一致,仅在个别临界站位有所不同,表明两种特征距离对原始数据的粒径输运趋势影响不大。图 5a、b 显示,CB+模式的输运趋势整体不明显,仅在 15 m 以深特别是 18 m 以深的细粒沉积地区具有较强的粒径输运趋势;而 FB-模式在整个研究区均具有较强的粒径输运趋势。相较原始数据而言,规则分布的粒径净输运趋势能够体现更多的细节,且 FB-趋势矢量的变化与粒径空间分布特征具有一定的相关性。另外,因为每种沉积物输运趋势都对应各自的沉积环境,我们对两种常见的沉积物输运趋势(CB+/FB-)进行了 Global Moran's I 空间自相关性检验,FB-模式值为 0.519,CB+模式值为 0.078。前者自相关性较高,满足检验,后者则不满足^[17,31]。因此,我们在本次研究中选则了 FB-模式作为滦河水下三角洲粒径净输运趋势的模式。

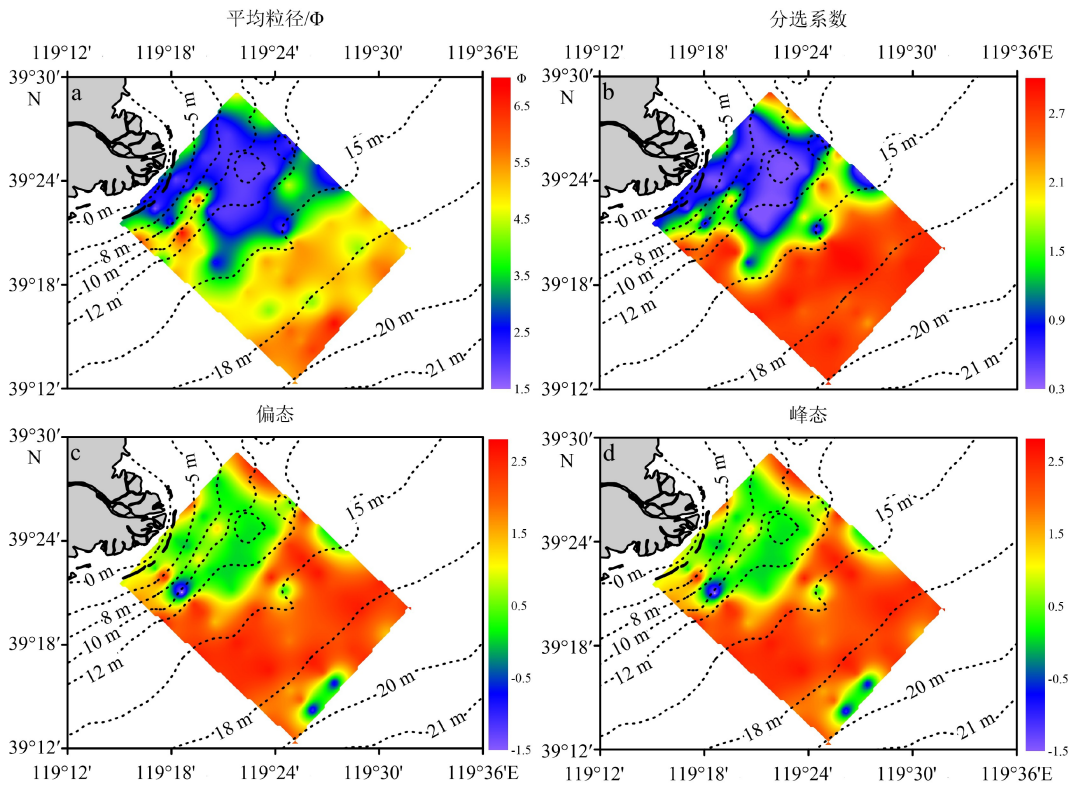


图 5 滦河水下三角洲粒径净输运趋势
a. 插值后 CB+模式,特征距离 0.09°; b. 插值后 FB-模式,特征距离 0.09°;
c. 未插值 FB-模式,特征距离 0.042°; d. 未插值 FB-模式,特征距离 0.059°。

Fig.5 Sediment transport trend in the modern LRSD

a. CB+ case of regular data with characteristic distance of 0.09 decimal degree; b. FB- case of regular data with characteristic distance of 0.09 decimal degree; c. FB- case of irregular data with characteristic distance of 0.042 decimal degree; d. FB- case of irregular data with characteristic distance of 0.059 decimal degree.

滦河三角洲地统计学净输运趋势图表明(图 5b), 水深 12 m 以浅地区净输运趋势具有向陆和向海的两种趋势。其中, 该区域南部以向海为主, 具有向西南方向输运的趋势。北部输运趋势则以向陆为主, 具有向西和向北的趋势。净输运趋势在水深 12~15 m 范围内近似平行于岸线, 向西南方向输运, 且其趋势在研究区最大, 仅在东北部边界区域具有向海输运的趋势。水深 15 m 以深范围内的粒径输运趋势较为复杂, 整体表现为南部向西北方向输运, 北部向东南方向输运, 中部向南和西部输运, 且向南和向西方向输运的趋势大于向北和向东输运的趋势。

3.3 粒度组分

基于 Weibull 分布函数的粒度组分分离结果(图 6)显示, 研究区粒径组分由细到粗可以划分为 EM1、EM2、EM3 和 EM4 共 4 个粒径端元。拟合系数高达 0.97, 满足拟合需求。其中, EM1 端元粒径区间范围为 0.37~11.36 Φ , 对应中值粒径为 5.87 Φ , 平均含量为 30.62%, 出现在 65 个站位中。端元组分丰度空间分布图(图 7)显示, EM1 端元主要分布于水深 15 m 以深, 在水深 18 m 以深丰度超过 65%。15 m 以浅丰度较低, 主要分布在研究区西南侧, 向东北方向呈舌状分布, 在其他地区仅零星分布。

EM1 组分主要对应潮流搬运, 且该地区无其他大型河口, 沉积物主要来源于滦河三角洲。

EM2 端元粒径区间范围为 1.37~5.62 Φ , 对应中值粒径为 3.50 Φ , 平均含量为 22.64%, 共计 69 个站位发现该端元。EM2 端元丰度最高处分布在研究区西南侧靠近滨岸沙坝处, 丰度超过 65%, 在 15 m 以深地区分布较广但是丰度稍低, 仅为 30%~45%。另外, 研究区东北端亦有少量分布。5 m 以浅的该端元可能是河流与波浪的共同作用下在南部滨岸沙坝地区富集的结果, 而 15 m 以深地区的 EM2 端元则可能是海平面上升过程中的波浪作用下的砂质滞留沉积^[40]。

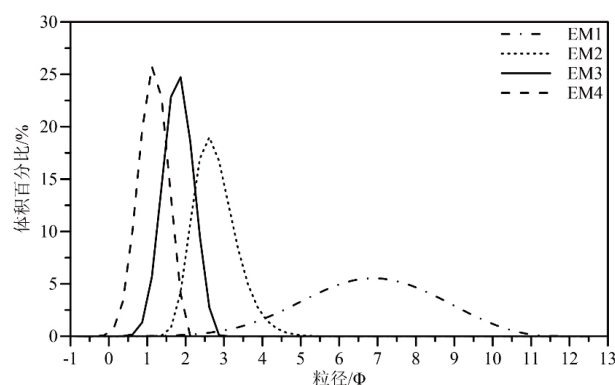


图 6 端元组分含量-粒径特征

Fig.6 Volume versus grain size of end members

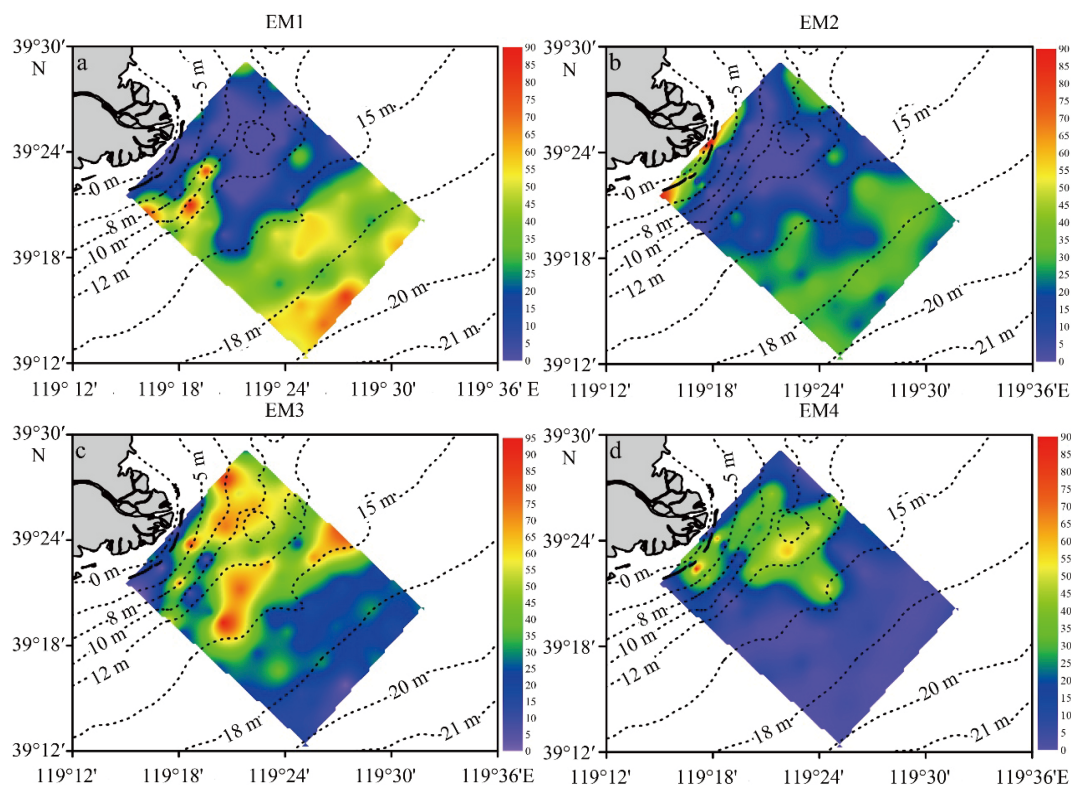


图 7 端元组分丰度 (%) 空间分布

Fig.7 Spatial distribution of end member abundances (%)

EM3 端元粒径区间为 $0.37\sim 2.62\Phi$, 对应中值粒径为 1.50Φ , 含量范围为 $0\sim 93.44\%$, 平均含量 33.38% , 在 4 个粒径组分端元中最高, 出现在 81 个站位中。EM3 端元集中分布于 $5\sim 15\text{ m}$ 水深处, 呈现 3 个集中分布地区, 丰度基本在 60% 以上, 15 m 以深丰度较低, 多在 20% 以下, 丰度超过 20% 的站位仅零星分布。EM4 端元粒径区间范围为 $-0.38\sim 2.12\Phi$, 对应中值粒径为 0.87Φ , 含量范围为 $0\sim 91.90\%$, 平均含量为 13.35% , 出现在 68 个站位中。EM4 端元多分布于 12 m 以浅, 12 m 以深仅有 1 个站位丰度较高, 其他站位丰度基本在 5% 以下。该端元集中分布于研究区中部 $10\sim 12\text{ m}$ 水深区域, 在西南沙坝地区有零星的高丰度站位出现, 其余站位丰度基本在 20% 以下。EM3 和 EM4 端元中值粒径分别对应中砂和粗砂, 且近岸处正对河口, 8 m 水深以浅的沉积物可能为洪季滦河在河流作用下搬运至此^[24], 但是 10 m 以深的大部分地区应当是冰消期海平面上升过程中在波浪作用下形成的砂质残留沉积^[40]。

4 讨论

4.1 净输运趋势验证

姜太良等^[41]根据多站位实测洪枯季水文观测

的结果, 认为滦河三角洲海域净输沙方向与余流方向比较一致, 净输沙的主要动力来自于余流。洪季水深 10 m 以浅地区, 泥沙离开河口向东南偏南方向迁移, 10 m 以深海域的泥沙则主要向西南方向迁移(图 8)。Xue 等^[39]对滦河三角洲北部测流数据分析表明, 涨落潮流基本与岸线平行, 涨潮流向东北, 落潮流向西南, 且涨潮流稍大于落潮流(图 8)。

将基于地统计学的粒径输运趋势与该地区已经发表的实测数据进行比较(图 8), 以验证粒径净输运趋势的可靠性。H201 站位枯季余流指向接近正东, 洪季余流指向东南偏南, 该站位所在区域的粒径净输运趋势整体指向西南方向, 与洪季潮流方向具有约 30° 的偏差。H202 站位附近粒径净输运趋势方向为东南偏南向, 与余流方向更加接近, 两者夹角为 $10^\circ\sim 15^\circ$ 。H203 站位枯季余流与输沙均为东北向, 洪季余流与输沙均为西南向, 与该地区粒径净输运趋势方向具有约 30° 偏差, 整体上均为西南方向。HBL05 站位输沙方向与粒径净输运趋势相近, 均为东北方向。HBL06 站位实测输沙方向与粒径净输运趋势方向基本相反, 实测输沙方向为东北偏东向, 而净输运趋势方向为西南偏西方向, 与落潮流方向接近一致。H301 站位洪季余流与输沙为西南偏南方向, 具有向海输运的趋势, 枯季余流与输沙为西南偏西方向, 具有向陆输运趋势, 净输运趋势同样具有向陆输运的特征, 但其与实测输

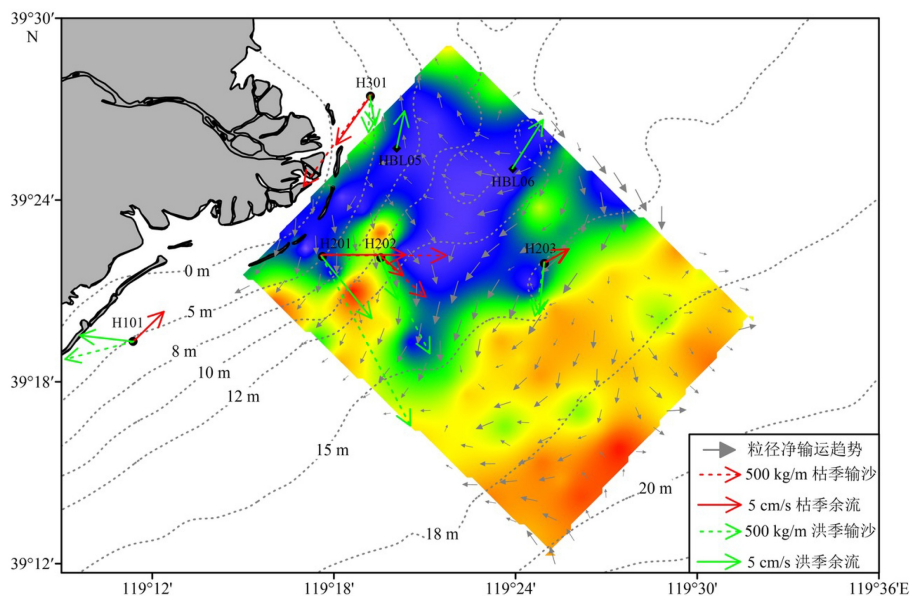


图 8 滦河水下三角洲沉积物输运模式

红色实线为枯季余流, 红色虚线表示枯季输沙, 绿色实线为洪季余流, 绿色虚线为洪季输沙。

Fig.8 Model of the sediment transportation in the LRS

Red solid lines denote the residual current in dry season, red dotted lines denote the sediment transport in dry season, green solid lines denote the residual current in flood season, and green dotted lines denote the sediment transport in flood season.

沙方向呈接近 90° 的夹角。H101 站位虽然离滦河三角洲地区较远,但其洪季输沙方向与研究区西部粒径净输运趋势的方向接近一致,均为西南方向。

整体而言,各站位实测潮流和输沙数据与粒径净输运趋势具有较好的一致性,特别是在沉积物粒度分布相对较细的区域,如 H201、H202、H203 和 H101 等站位,实测输沙方向与粒径净输运趋势方向夹角基本在 30° 以内。相反,在沉积物粒径较粗的北部地区,实测输沙方向与粒径净输运趋势方向虽然具有一定的一致性,但是偏差较大,部分站位甚至存在与实测输沙方向相反的现象。因此,在利用净输运趋势对沉积物输运进行解译的过程中应当慎重。

4.2 沉积环境与粒径净输运趋势解释

研究区 5 m 以浅的 EM2 组分富集区具有向西南部细粒舌状条带输运的粒径净输运趋势(图 7、8),可能是近岸的细粒沉积物在潮流作用下向西南方向输运^[29]。研究区北部砂质沉积区分布在 5~15 m 等深线之间,粒径净输运趋势整体上为西南方向,在北部地区具有向西北输运的趋势。李从先等^[24]曾在外业调查中观测到滦河在洪季形成的浑浊条带可以向东北延伸 8 km 左右,说明该砂质地区在

洪季是可以接受细粒的三角洲远端沉积的。然而,表层沉积物调查显示该地区 EM1 端元丰度趋近于 0,未发现细粒沉积,但是其粒径净输运趋势具有较强的向西南输运的趋势,且与 H203 站位余流方向和 HBL05、HBL06 站位落潮流方向一致,推测该地区在洪季沉积的细粒沉积物在潮流作用下,大部分被搬运到研究区西部地区,少部分可能被搬运到北部地区和南部深水地区。水深-离岸距离图(图 9)和水深等值线图均显示,砂质沉积区存在较大规模的水下沙坝和沟谷地形,且粒度在沙坝等正地形地区相对较粗,而在 15 m 以深地区则相对较细。该地区沙坝水深多在 8~15 m 之间,而渤海浪控地区的现代水下沙坝通常不会超过 10 m 水深。结合该地区发育的现代浪控海岸地貌,推测这些沙坝可能是冰消期在波浪作用下形成,在高海平面之后,沙坝和沟谷地形又加快了潮流流速,导致细粒沉积物无法在该地区长期保存。

离岸地区(15 m 以深)东部接受来自三角洲的细粒沉积物,并具有向海输运的净输运趋势,可能是三角洲远端细粒沉积物在潮流作用下的再沉积。而西部地区则具有西北方向的粒径净输运趋势,可能与该地区远离河口地区而缺少细颗粒沉积物,细粒海洋沉积物在潮流作用下向浅水地区搬运有关。

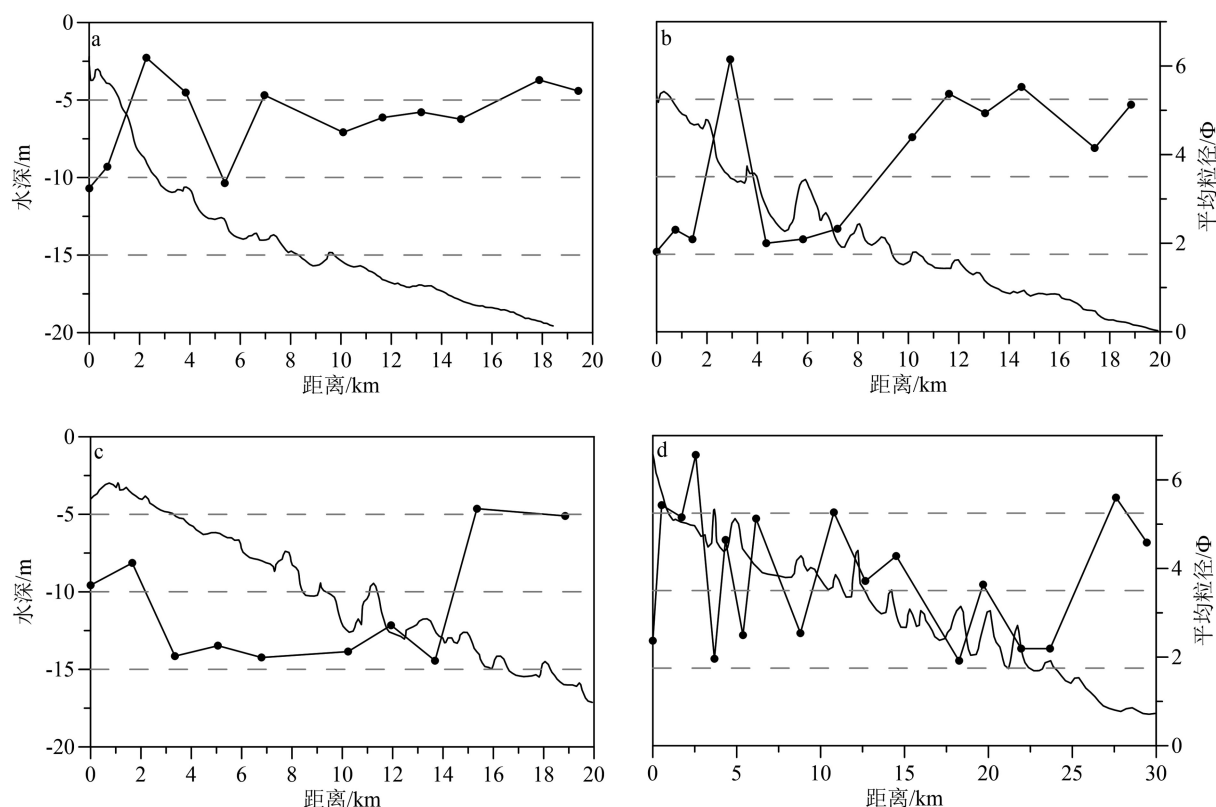


图9 水深-离岸距离与平均粒径-离岸距离图(位置见图1)

Fig.9 Plots of depth versus offshore distance and mean grain size versus offshore distance (see fig.1 for locations)

粒径净输运趋势分析和粒径曲线数学拟合方法揭示了滦河水下三角洲复杂的沉积环境,受河流、波浪、潮流、地形、残留沉积等多种因素影响,复杂的沉积环境也对粒径净输运趋势的分析产生了一定的影响,导致该方法只能部分解释沉积物的运移趋势。在沉积动力复杂的三角洲地区,仍需要结合地形及端元分析等方法来更好地解释三角洲的沉积环境。

5 结论

(1)现代滦河三角洲北部(5~15 m水深)存在一砂质(中粗砂)沉积区,并发育水下沙坝-沟谷地形,是低海平面时期的残留沉积。近岸5 m以浅沉积是河流搬运的细砂,15 m以深分布砂质粉砂。

(2)地统计学计算的特征距离为0.09°,且方向与涨落潮流方向相近。粒径输运趋势显示,南部水深12 m以浅地区具有向西南方向输运趋势,北部具有向西或向北的趋势。

(3)水深12~15 m范围内近似平行于岸线向西南方向输运,仅在东北部边界区域具有向海输运的趋势。水深15 m以深范围内的粒径输运趋势较为复杂,整体表现为南部向西北方向输运,北部向东南方向输运,中部向南和西部输运,且向南和向西方向输运的趋势大于向北和向东输运的趋势。

(4)粒径输运趋势整体上与实测潮流、余流和泥沙输运方向一致,表明地统计学粒径趋势分析能够较好地解释三角洲地区的潮流作用。然而,仍然需要结合地形及端元分析等方法以更好地解释残留沉积、地形和河流等作用的影响。

参考文献 (References)

- [1] Yamashita S, Naruse H, Nakajo T. Reconstruction of sediment-transport pathways on a modern microtidal coast by a new grain-size trend analysis method [J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2018, 5: 7.
- [2] McCave I N. Grain-size trends and transport along beaches: example from eastern England [J]. *Marine Geology*, 1978, 28 (1-2): M43-M51.
- [3] McLaren P. An interpretation of trends in grain size measures [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1981, 51 (2): 611-624.
- [4] McLaren P, Ren P. Sediment transport and its environmental implications in the lower Fraser River and Fraser delta [M]. Environment Canada: Environmental Conservation, 1995.
- [5] Gao S, Collins M. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors" [J]. *Sedimentary Geology*, 1992, 81 (1-2): 47-60.
- [6] Ma F, Wang Y P, Li Y, et al. The application of geostatistics in grain size trend analysis: A case study of eastern Beibu Gulf [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20 (1): 77-90.
- [7] Sánchez A, Choumiline E, López-Ortiz B E, et al. Sediment transport patterns in Magdalena Bay, Baja California Sur, Mexico, inferred from grain-size trends [J]. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 2010, 38 (2): 167-177.
- [8] Choi T J, Choi J Y, Park J Y, et al. The effects of nourishments using the grain-size trend analysis on the intertidal zone at a sandy macrotidal beach [J]. *Journal of Coastal Research*, 2018, 85 (S1): 426-430.
- [9] De Falco G, Molinaroli E, Baroli M, et al. Grain size and compositional trends of sediments from *Posidonia oceanica* meadows to beach shore, Sardinia, western Mediterranean [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 58 (2): 299-309.
- [10] Nugroho S H, Putra P S. Spatial distribution of grain size and depositional process in tidal area along Waikelo Beach, Sumba [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2017, 36 (3): 299-307.
- [11] Pedreros R, Howa H, Michel D. Application of grain size trend analysis for the determination of sediment transport pathways in intertidal areas [J]. *Marine geology*, 1996, 135 (1-4): 35-49.
- [12] Clarke D W, Boyle J F, Chiverrell R C, et al. A sediment record of barrier estuary behaviour at the mesoscale: interpreting high-resolution particle size analysis [J]. *Geomorphology*, 2014, 221: 51-68.
- [13] Hegde V S, Nayak S, Krishnaprasad P, et al. Evolution of diverging spits across the tropical river mouths, central west coast of India [J]. *Journal of Coastal Zone Management*, 2015, 18 (2): 1000402.
- [14] Li T, Li T J. Sediment transport processes in the Pearl River Estuary as revealed by grain-size end-member modeling and sediment trend analysis [J]. *Geo-Marine Letters*, 2018, 38 (2): 167-178.
- [15] Cheng P, Gao S, Bokuniewicz H. Net sediment transport patterns over the Bohai Strait based on grain size trend analysis [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 60 (2): 203-212.
- [16] 程鹏, 高抒. 北黄海西部海底沉积物的粒度特征和净输运趋势 [J]. *海洋与湖泊*, 2000, 31 (6): 604-615. [CHENG Peng, GAO Shu. Net sediment transport patterns over the northwestern Yellow Sea, based upon grain size trend analysis [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31 (6): 604-615.]
- [17] Poizot E, Méar Y, Biscara L. Sediment Trend Analysis through the variation of granulometric parameters: A review of theories and applications [J]. *Earth Science Reviews*, 2008, 86 (1-4): 15-41.
- [18] Gao S, Collins M, McLaren P, et al. A critique of the "McLaren Method" for defining sediment transport paths; discussion and reply [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1991, 61 (1): 143-147.
- [19] Gao S, Xie Q C, Feng Y J. Fine-grained sediment transport and sorting by tidal exchange in Xiangshan Bay, Zhejiang, China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1990, 31 (4): 397-409.
- [20] Gao S, Collins M. Tidal Inlet equilibrium, in relation to cross-sectional area and sediment transport patterns [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1994, 38 (2): 157-172.
- [21] Poizot E, Mear Y, Thomas M, et al. The application of geostatistics in defining the characteristic distance for grain size trend analysis [J]. *Computers & Geosciences*, 2006, 32 (3): 360-370.

- [22] 高抒. 沉积物粒径趋势分析: 原理与应用条件[J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 826-836. [GAO Shu. Grain size trend analysis: principle and applicability [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 826-836.]
- [23] 高善明, 李元芳, 安凤桐, 等. 滦河三角洲滨岸沙体的形成和海岸线变迁[J]. 海洋学报, 1980, 2(4): 102-114. [GAO Shanming, LI Yuanfang, AN Fengtong, et al. The formation of sand bars on the Luanhe River Delta and the change of the coast line [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1980, 2(4): 102-114.]
- [24] 李从先, 陈刚, 王传广, 等. 论滦河冲积扇-三角洲沉积体系[J]. 石油学报, 1984, 5(4): 27-36. [LI Congxian, CHEN Gang, WANG Guangchuan, et al. On the Luanhe River Alluvial Fan-delta complex [J]. Acta Petrolei Sinica, 1984, 5(4): 27-36.]
- [25] 薛春江. 滦河冲积扇-三角洲的范围和类型及其演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(6): 13-22. [XUE Chunting. Extents, type and evolution of Luanhe River Fan-delta system, China [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016, 36(6): 13-22.]
- [26] 王保民. 河北省海洋资源调查与评价综合报告[M]. 北京: 海洋出版社, 2007. [WANG Baomin. Comprehensive Report on Investigation and Evaluation of Marine Resources in Hebei Province[M]. Beijing: Ocean Presee, 2007.]
- [27] 王保民. 河北省海洋资源调查与评价专题报告(上册、下册)[M]. 北京: 海洋出版社, 2007. [WANG Baomin. Thematic Reports (Volume I, Volume II) on Investigation and Evaluation of Marine Resources in Hebei Province[M]. Beijing: Ocean Presee, 2007.]]
- [28] 康雪宁, 印萍, 刘金庆. 我国中小河流入海水沙变化对人类活动响应——以滦河为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(6): 1-6. [KANG Xuening, YIN Ping, LIU Jinqing. Variations in water and sediment discharges of mediam and small rivers and their response to human activities: a case study on the Luan River [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016, 36(6): 1-6.]
- [29] 黎刚, 殷勇. 滦河下游河道及三角洲地貌的近期演化[J]. 地理研究, 2010, 29(9): 1606-1615. [LI Gang, YIN Yong. Recent geomorphological evolution of downstream channel and delta of Luanhe River [J]. Geographical Research, 2010, 29(9): 1606-1615.]
- [30] Mcmanus J. Grain size determination and interpretation[M]//Tucker M. Techniques in Sedimentology. Oxford, UK: Blackwell Scientific Publications, 1988: 63-85.
- [31] Poizot E, Méar Y. eCSedtrend: A new software to improve sediment trend analysis [J]. Computers & Geosciences, 2008, 34(7): 827-837.
- [32] Yu X X, Li T G, Gu D Q, et al. Sediment transport in the Luanhe River delta: grain size trend analysis [J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2019, 37(3): 982-997.
- [33] Ashley G M. Interpretation of Polymodal Sediments [J]. The Journal of Geology, 1978, 86(4): 411-421.
- [34] 孙东怀, 安芷生, 苏瑞侠, 等. 古环境中沉积物粒度组分分离的数学方法及其应用[J]. 自然科学进展, 2001, 11(3): 269-276. [SUN Donghuai, AN Zhisheng, SU Ruixia, et al. Method and application of numerical partitioning of the sediment components in paleoclimate environments [J]. Progress in Natural Science, 2001, 11(3): 269-276.]
- [35] 孙东怀, 鹿化煜, Rea D, et al. 中国黄土粒度的双峰分布及其古气候意义[J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 327-335. [SUN Donghuai, LU Huayu, Rea D, et al. Bimode Grain-size distribution of Chinese loess and its paleoclimate implication [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(3): 327-335.]
- [36] 段晓勇, 印萍, 刘金庆, 等. 滦河口表层沉积物中重金属和多环芳烃的分布、来源及风险评估[J]. 中国环境科学, 2016, 36(4): 1198-1206. [DUAN Xiaoyong, YIN Ping, LIU Jinqing, et al. Heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of Luan River estuary: distributions, sources and ecological risk assessments [J]. China Environmental Science, 2016, 36(4): 1198-1206.]
- [37] 刘金庆, 印萍, 张勇, 等. 滦河口沉积物重金属分布及生态风险评价[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(5): 43-52. [LIU Jinqing, YIN Ping, ZHANG Yong, et al. Distribution of heavy metals in surface sediments of the Luanhe River Estuary and ecological risk assessment [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016, 36(5): 43-52.]
- [38] 乔淑卿, 石学法, 王国庆, 等. 渤海底质沉积物粒度特征及输运趋势探讨[J]. 海洋学报, 2010, 32(4): 139-147. [QIAO Shuqing, SHI Xuefa, WANG Guoqing, et al. Discussion on grain-size characteristics of seafloor sediment and transport pattern in the Bohai Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 32(4): 139-147.]
- [39] Xue Z, Feng A P, Yin P, et al. Coastal erosion induced by human activities: a northwest Bohai Sea case study [J]. Journal of Coastal Research, 2009, 25(3): 723-733.
- [40] 刘振夏. 现代滦河三角洲的影响因素和沉积物分区[J]. 海洋科学进展, 1989, 7(4): 55-64. [LIU Zhenxia. The influential factors and zoning of the modern Luanhe River Delta [J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1989, 7(4): 55-64.]
- [41] 姜太良, 房宪英, 徐洪达, 等. 滦河口径流量和滦河口输沙分析[J]. 海洋科学进展, 1986, 4(4): 100-113. [JIANG Tailiang, FANG Xianying, XU Hongda, et al. Analysis of the water discharge and sediment load in the Luanhe River Estuary [J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1986, 4(4): 100-113.]