

杨光, 任春宇, 石勇, 等. 气候变化和人类活动影响下黄河远端泥北支粒度组分变化及其区域沉积效应[J]. 海洋学报, 2023, 45(2): 74–84, doi:10.12284/hyxb2023021

Yang Guang, Ren Chunyu, Shi Yong, et al. Variations in grain size composition and regional sedimentary effects in the north branch of Huanghe River distal mud induced by climate changes and human activities[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(2): 74–84, doi:10.12284/hyxb2023021

气候变化和人类活动影响下黄河远端泥北支粒度组分变化及其区域沉积效应

杨光¹, 任春宇¹, 石勇¹, 徐笑梅¹, 高建华^{1*}

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院 海岸与海岛开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210023)

摘要: 受限于海洋动力条件的复杂性, 基于陆架泥质沉积重建的古气候或古环境一直存在争议。为此, 本文在北黄海地区沿沉积物输运路径采集 3 根柱样, 通过沉积物粒度及其端元组分和基于器测数据的东亚冬季风指数和黄海暖流强度, 分析了不同泥区沉积物粒度端元组分对冬季风暴和黄海暖流变化的响应机理和强度, 揭示了上述变化在不同区域产生的沉积效应。结果表明, 近百年以来黄河远端泥北支的沉积物组分变化受到了自然因素和人类活动的共同影响。1980 年以后, 人类活动对黄河沉积物入海通量及其组成的影响开始增强, 并掩盖了自然演化信息。而 1980 年以前, 不同泥区的不同端元组分对冬季风暴和黄海暖流的响应机理和强度存在差异, 具有显著的区域沉积效应: 粗端元组分受冬季风暴强度变化主导, 能够反映山东半岛北岸跨锋面物质输运强度的变化; 细端元组分受到黄海暖流强度变化主导, 反映沉积物从北黄海西部泥区到辽东半岛东岸泥区的输运过程。上述结论说明, 虽然粒度是表征古气候和古环境变化的重要标志物, 但应根据不同泥区沉积物来源和沉积动力环境的特点, 谨慎选择敏感端元组分, 正确地使用粒度指标。

关键词: 北黄海; 粒度; 冬季风暴; 黄海暖流; 跨锋面物质输运

中图分类号: P736.21

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)02-0074-11

1 引言

受东亚冬季风引起的冬季风暴驱动, 中国东部陆架泥区的沉积物存在“夏储冬输”的输运模式^[1], 因此沉积记录中蕴含着丰富的动力变化、古气候和古环境演变信息。冬季风暴引起的水动力增强可影响沉积物的粒度组成^[2], 基于这一原理, 许多学者以粒度敏感组分作为替代性指标, 分析东亚冬季风强度在不同时间尺度的变化^[3-6]。但也有一些学者对粒度敏感组分反演东亚冬季风强度变化的适用性和准确性仍存在一些疑问^[4,7-11]。Tu 等^[12]对中国东部陆架区有关粒

度敏感组分反演的全新世东亚冬季风演化的研究进行了梳理, 对所有 15 个站位的反演结果分 3 个时间尺度进行了对比。结果发现, 不同泥区(甚至同一泥区不同位置)得到的冬季风演化趋势差异较大, 有的时间段甚至趋势相反, 建议谨慎使用粒度敏感组分反演东亚冬季风强度变化。因此, 针对不同的沉积环境, 需要厘清冬季风暴、动力过程与沉积物粒度组分变化之间的相互关系, 正确认识粒度组分在相关研究中的代表性和有效性。

事实上, 粒度组分变化是物源、冬季风暴及其与之相关的动力过程和陆架环流等多重因素共同所致,

收稿日期: 2022-08-04; 修订日期: 2022-09-02。

基金项目: 国家自然科学基金(42276170, 42106158)。

作者简介: 杨光(1997—), 男, 吉林省通化市人, 研究方向为海洋沉积学。E-mail: sunshinegeog@163.com

* 通信作者: 高建华(1973—), 教授, 主要从事海洋沉积动力学研究。E-mail: jhgao@nju.edu.cn

非冬季风暴单一主导^[12-14]。另外,由于不同海域的动力环境具有较大的差异,即使是同一来源的沉积物,其对冬季风暴强度的响应在不同区域也可能产生不同的沉积效应。因此,基于过程-产物关系,从与冬季风暴密切相关的特定海洋动力过程入手,系统分析气候变化-冬季风暴-动力过程-沉积效应之间的关系,有助于理解沉积物粒度对沉积物供给、冬季风暴和相应动力过程变化的响应机理,认识上述变化在不同区域产生的沉积效应,从而为正确使用粒度指标反演古气候和古环境变化提供理论依据。

传统意义上的黄河远端泥是包括从莱州湾开始,环山东半岛直至南黄海中部的全新世泥质沉积体系^[15-17];但最新研究表明,辽东半岛东岸泥区西部的细粒沉积物大部分来源于黄河^[18]。因此,本文将北黄海西部泥区和辽东半岛东岸泥区西部统称为黄河远端泥北支,而传统的黄河远端泥叫做黄河远端泥南支。冬季风暴影响下,山东半岛北岸黄河来源物质能够突破锋面(黄海暖流与鲁北沿岸流)的“屏蔽效应”,产生跨锋面物质输运。一部分跨锋面沉积物沉降在北黄海西部泥区,而另一部分在黄海暖流的输运下进入辽东半岛东岸泥区^[19]。沉积物在泥区间的输运与冬季风暴和陆架环流密切相关,对气候变化敏感;此外,该地区沉积物主要来源于黄河,近年来的物源供给深受人类活动影响。因此,黄河远端泥北支是研究气候变化(与冬季风暴和陆架环流相关的动力过程)、人类活动(沉积物供给)和粒度组分间相互变化关系,及其在不同区域引发的沉积效应的理想区域。

基于以上认识,本文通过沿黄河远端泥北支的3个泥质区采集柱样,进行高分辨率沉积物粒度分析,结合²¹⁰Pb定年,在百年时间尺度上,分析不同泥区沉积物粒度端元组分对冬季风暴和黄海暖流变化的指示意义,探讨沉积物组分对物源供给、冬季风暴和陆架环流强度变化的年际/年代际响应规律及其在不同时间段的主控因素,在此基础上分析和对比不同泥区对上述变化的响应差异。

2 研究区概况

北黄海是被辽东半岛、山东半岛和朝鲜半岛包围的半封闭海域,冬季流系主要受鲁北沿岸流、辽南沿岸流和黄海暖流控制。研究区冬季多西北风和北风,6级(10.8~13.8 m/s)以上的大风虽四季都有出现,但以冬季强度大、春季次数多为主要特征,且大风区多位于渤海海峡至山东半岛顶端成山头一带^[17]。北黄海西侧沉积物以粉砂和黏土为主,由南向北依次分布

着环山东半岛泥质沉积、北黄海西部泥质沉积和辽东半岛东岸泥质沉积^[19](图1)。黄河物质入海后,在鲁北沿岸流的输运下经渤海海峡进入北黄海,在黄海暖流的约束下,一部分绕过成山头后向南输运,形成环山东半岛泥质沉积^[15,20];另一部分则向东北方向扩散进入北黄海,形成北黄海西部泥质沉积^[16,19,21]。

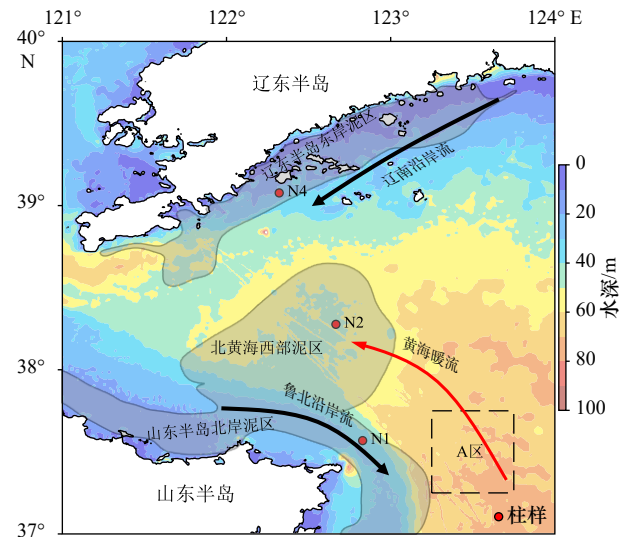


图1 研究区位图

Fig. 1 Map of survey location

先前的研究认为,鸭绿江入海物质随辽南沿岸流向西南输运,形成了辽东半岛东岸泥质区^[22-24]。而最新研究发现,山东半岛北岸的黄河来源物质也可扩散至辽东半岛东岸泥区^[19,25-26]。浅剖数据也显示,北黄海西部泥区和辽东半岛东岸泥区之间存在细颗粒沉积物通道将二者相连,即山东半岛北岸的沉积物可通过特定的路径输运到辽东半岛东岸^[13]。

3 材料与方法

2020年12月对北黄海西部海域进行野外调查(图1),用单管取样器采集3根短柱样,放入冰箱冷冻保存,柱样信息如表1所示。粒度测试以0.25 cm间隔进行分样,共560个子样。²¹⁰Pb测试中,柱样上端0~10 cm以1 cm间隔分样,10 cm到底部以4 cm间隔分样,共58个子样。采用常量初始浓度(CIC)模

表1 柱样信息

Table 1 The information of sample columns

柱样编号	纬度	经度	水深/m	长度/cm
N1	37.59°N	122.88°E	40	60.5
N2	38.28°N	122.67°E	50	38
N4	39.08°N	122.32°E	25	41.5

式建立沉积物岩芯年代序列, 计算沉积速率^[27]。在 MATLAB 环境下运用 Paterson 和 Heslop^[28] 提供的 Anysize-masters 程序对粒度数据进行端元分析, 选择参数化方法中 Gen. Weibull 分布函数进行端元分解。以上实验均于南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室完成。

研究区海表温度数据有两个来源: 1900–1997 年采用 SODA2.2.4 版本的逐月再分析资料^[29–31], 其涵盖的时间范围是 1871–2010 年, 空间分辨率为 0.5°; 1998–2020 年采用欧洲中期天气预报中心的 ERA5 月平均海表面温度资料^[32–33], 时间范围是 1950–2020 年, 空间分辨率为 0.25°。在黄海暖流主轴选取 A 区(图 1), 分析其在 1900–2020 年 11 月、12 月、翌年 1 月、翌年 2 月和翌年 3 月的海表温度变化, 指示黄海暖流的强度。本文所使用的东亚冬季风指数有两个来源: 1900–1997 年的东亚冬季风指数引自文献^[34]; 1998–2020 年的东亚冬季风指数是根据西伯利亚高压和阿留申低压强度之差定义^[35], 计算中所使用的海平面气压数据取自美国 NCEP/NCAR 的再分析资料^[36]。东亚冬季

风指数和海表温度的两套数据分别在 1960–1997 年和 1951–2000 年间重合, 通过对比发现, 同一指标的两套数据在重合的时间段内的阶段性变化趋势相同, 具有可联用性。使用小波交叉谱的方法研究气候指标与沉积物端元组分之间相关关系, 为避免产生边界效应, 在小波变换前将原资料序列进行了对称性的拓展^[37]。

4 结果

4.1 ²¹⁰Pb 测年

柱样 N1、N2 和 N4 不同深度层位对应的 ²¹⁰Pb 活度如图 2 所示。柱样 N1 的 ²¹⁰Pb 垂向分布较为复杂, 在 0~10 cm 范围内, ²¹⁰Pb 分布较为紊乱, 10 cm 以下呈现多次倒置的现象。柱样 N2 和 N4 分别在 14 cm 和 18 cm 达到本底值, 经计算, 二者的沉积速率均为 0.28 cm/a, 该结果与研究区已有测年结果较为一致^[38–40]。柱样 N2 和 N4 的沉积时间分别为 1884–2020 年和 1871–2020 年。由于本文沉积柱样的分样间隔为 0.25 cm, 因此沉积记录解译的时间分辨率可达 0.89 a, 可反映年际/年代际环境变化信息。

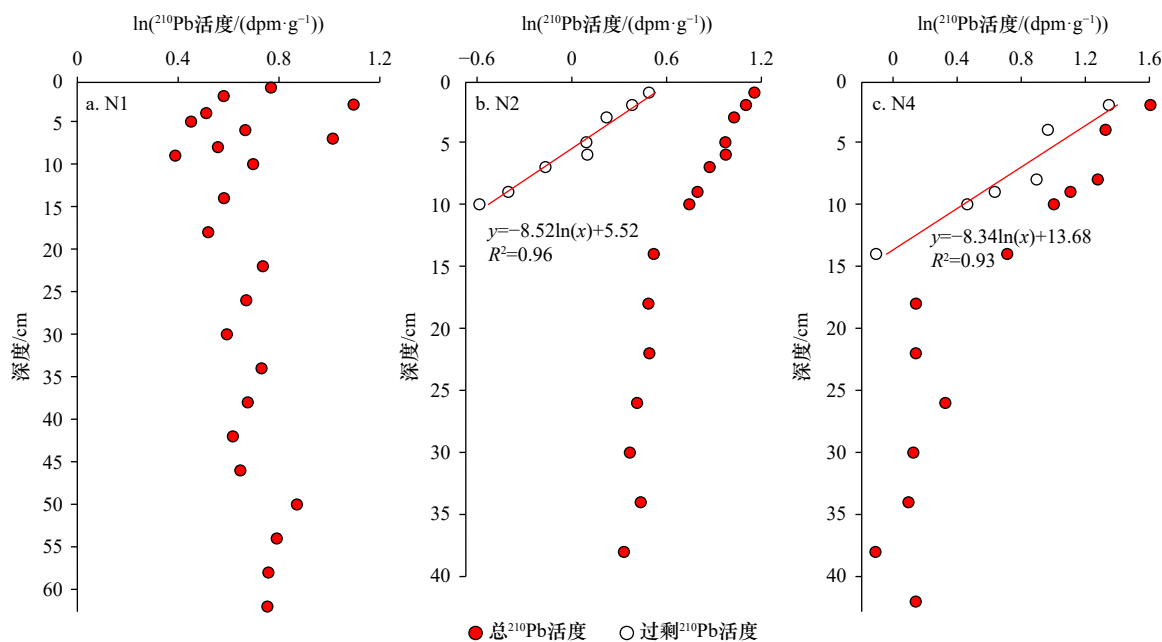


图 2 柱样 N1、N2 和 N4 总 ²¹⁰Pb 活度和过剩 ²¹⁰Pb 活度的垂向分布 (1 Bq=60 dpm)

Fig. 2 Vertical distributions of total and excess ²¹⁰Pb radioactivity in cores N1, N2 and N4 (1 Bq=60 dpm)

4.2 粒度特征及端元分析

柱样 N1、N2 和 N4 的平均粒径 Φ 分别介于 6.18~7.27、6.05~6.87 和 5.65~6.88 之间, 平均值分别为 6.75、6.52 和 6.48(图 3)。柱样 N1 平均粒径 Φ 在 6.0~7.0 之间剧烈波动, 但总体趋势稳定, 而柱样 N2 和 N4 平均粒径 Φ 则具有明显的阶段性变化: 在 33.75~25.5 cm 深度内平均粒径先变细后变粗; 而在 25.25~

20 cm 和 14.5~11.5 cm 深度内由粗到细, 在 17.75~14.75 cm、11.25~8.75 cm 和 5.5~1.5 cm 深度内由细到粗, 此外, 在 19.75~18 cm、8.5~5.75 cm 和 1.25~0 cm 深度内又出现相反的变化趋势。

假设端元数为 2、3、4、5、6 的情况下, 对所有粒度数据进行拟合(表 2)。通过对比发现, 端元数为 3 时, R^2 达到 0.97 以上。依据在满足拟合程度情况下

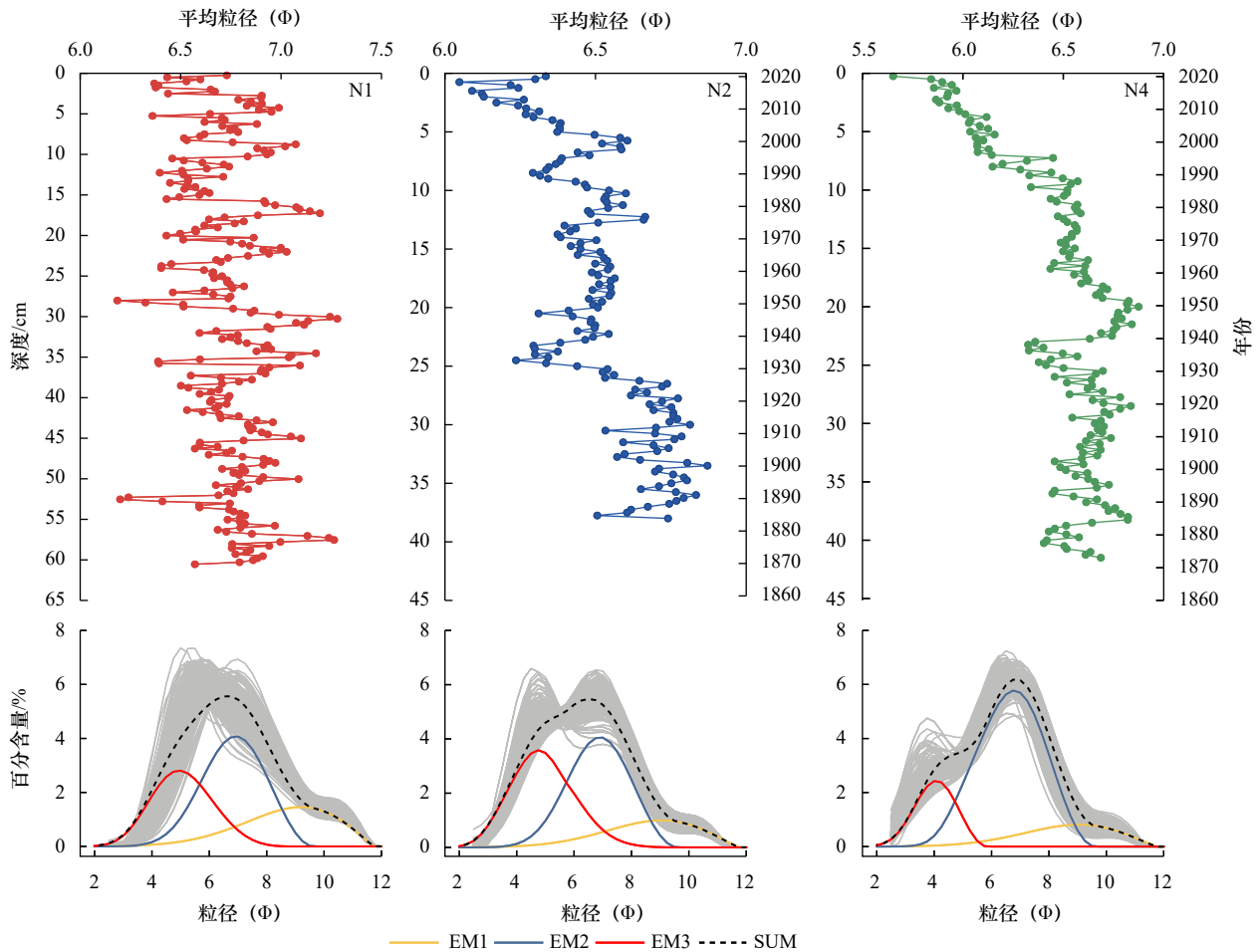


图3 柱样 N1、N2 和 N4 平均粒径垂向变化及端元频率分布曲线

Fig. 3 Vertical distributions of the mean grain size and frequency distribution curves of cores N1, N2 and N4

表2 端元拟合结果

Table 2 The results of end member unmixing

No. of EM _s	EM R^2	R^2	Theta
2	0.020	0.950	9.053
3	0.020	0.974	7.212
4	0.054	0.992	3.932
5	0.144	0.998	2.103
6	0.218	0.999	1.219

注: No. of EM_s为拟合端元数量; EM R^2 为所有拟合端元之间线性平方相关性的最大值; R^2 为测量数据集和拟合的端元数据集之间的线性平方相关性; Theta为测量数据集和拟合端元数据集之间的角度距离。

端元数应尽量较少的原则,选取3个端元对研究区柱样粒度数据进行分解,结果如图3所示。柱样 N1 是单峰分布,而柱样 N2 和 N4 为双峰分布。本文将 EM1 和 EM2 选做细端元组分,在柱样 N2 和 N4 中的占比分别为 60.87% 和 82.33%; EM3 代表粗端元组分(图3)。沉积物粒度的频率分布曲线显示,柱样 N2 的粗峰和细峰相当,而柱样 N4 的细峰显著大于粗

峰,以细峰为主。柱样 N2 和 N4 粗端元组分具有不同的粒径分布范围,而二者细端元组分的粒径分布范围却较为一致,N4 细端元组分含量高于 N2。

4.3 东亚冬季风和黄海暖流年代际变化

本文通过器测数据分析了近百年以来东亚冬季风指数和黄海暖流的年代际变化,结果显示东亚冬季风在 20 世纪 70 年代中期以前,主要有 2 次增强期(1930–1939 年和 1957–1968 年)和 3 次减弱期(1905–1929 年、1940–1956 年和 1969–1975 年)(图 4c)。1988 年和 1999 年前后东亚冬季风发生了显著变化:1988 年开始东亚冬季风从强变弱,到 1999 年之后又开始增强,2010 年后又出现减弱趋势,与前人的研究结果较为一致^[34,41]。

黄海暖流自 20 世纪初至 60 年代末,主要有 2 次增强期(20 世纪初至 20 年代中期和 30 年代末至 40 年代末)和 2 次减弱期(20 世纪 20 年代中期至 30 年代末和 50 年代初至 60 年代末)(图 4d)。20 世纪 70 年代处于海温相对较高时期,20 世纪 80 年代处于海温相对较低时期。1988 年前后,海温发生阶段性变化,出

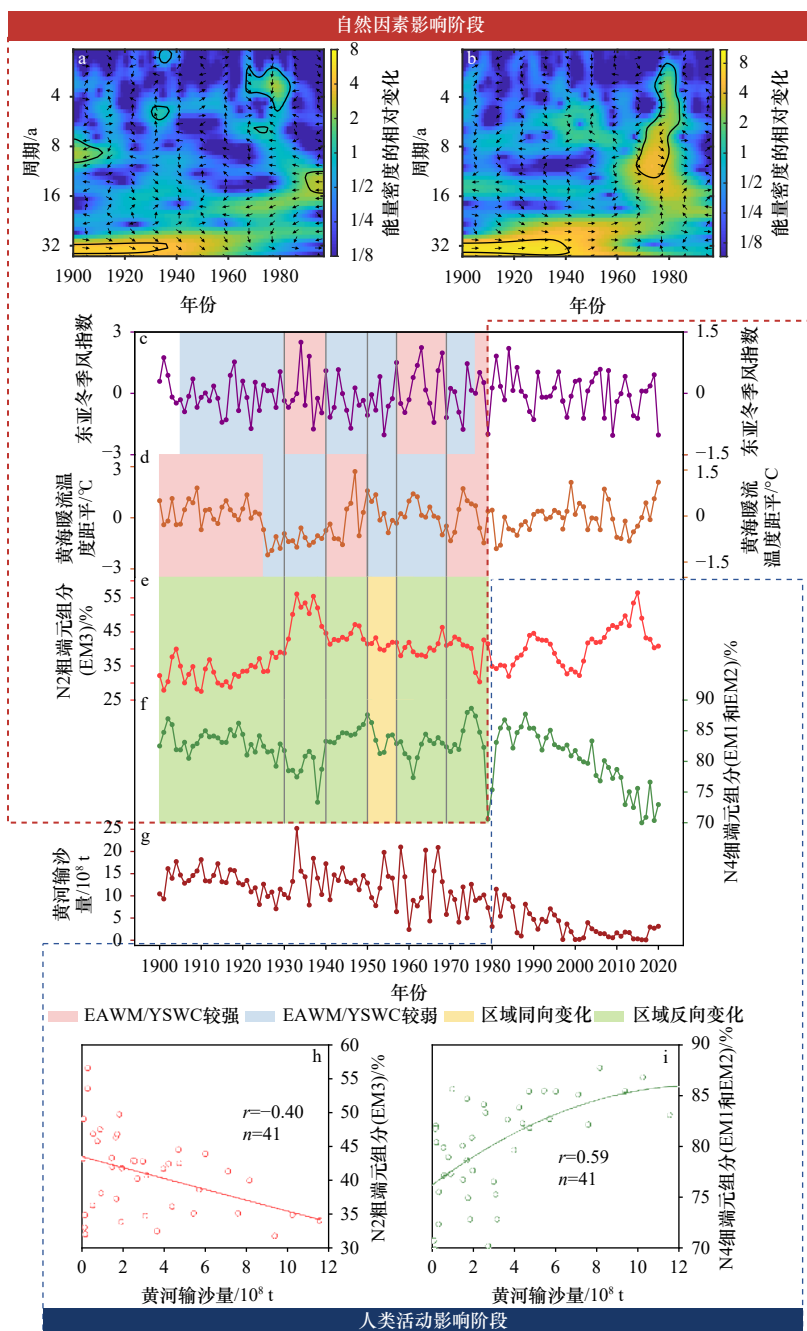


图4 1900–1997年东亚冬季风和N2粗端元组分(EM3)小波交叉谱(a)以及黄海暖流与N4细端元组分(EM1和EM2)小波交叉谱(b)。1900–2020年东亚冬季风指数(c)、黄海暖流温度距平(d)、N2粗端元组分(EM3)(e)、N4细端元组分(EM1和EM2)变化(f)和黄河输沙量(g)。1980–2020年黄河输沙量与柱样N2粗端元组分(EM3)(h)和柱样N4细端元组分(EM1和EM2)(i)之间的相关性

Fig. 4 Cross wavelet transform between East Asian Winter Monsoon (EAWM) and coarse-grained end member (EM3) of Core N2 (a) and between Yellow Sea Warm Current (YSWC) and fine-grained end member (EM1 and EM2) of core N4 (b) during 1900–1997. Variations in EAWM index (c), sea surface temperature (SST) anomaly of Yellow Sea Warm Current (d), coarse-grained end member (EM3) of Core N2 (e) and fine-grained end member (EM1 and EM2) of Core N4 (f). Correlation between sediment load delivered from the Huanghe River to the sea with coarse-grained end member (EM3) of Core N2 (h) and fine-grained end member (EM1 and EM2) of Core N4 (i) during 1980–2020

东亚冬季风指数, 1900–1997年数据引自文献 [34], 1998–2020年数据根据文献 [35] 的定义计算; 黄海暖流温度距平, 1900–1997年使用 SODA 数据计算, 1998–2020年使用 ERA5 数据计算

EAWM index was derived from reference [34] during 1900–1997 and was calculated using data from reference [35] during 1998–2020. SST anomaly of Yellow Sea Warm Current was calculated using SODA data during 1900–1997 and ERA5 data during 1998–2020

现由冷至暖的状态跃迁。1999–2014年,黄海暖流呈减弱的趋势。2014年后,黄海暖流呈增强趋势。黄海暖流变化的结果与前人的研究结果较为一致^[42–48]。

5 讨论

5.1 沉积物粒度端元组分对沉积动力环境的指示意义

从山东半岛北岸、北黄海西部和辽东半岛东岸3个泥区的物源供给关系来看:山东半岛北岸泥区(柱样 N1),是跨锋面物质的“源”;北黄海西部泥区(柱样 N2)发挥着“中转站”的功能,既是部分跨锋面沉积物的“汇”,同时也是运输至辽东半岛东岸沉积物的“源”;而辽东半岛东岸泥区(柱样 N4)则是部分跨锋面沉积物最终的“汇”。

本文3个柱状沉积物端元组分的沿程变化,也较好地解释了3个泥区的物源供给关系。从山东半岛北岸和北黄海西部泥区来看,虽然二者的沉积物粒径分布范围较为一致,但前者为单峰,而后者为双峰分布(图3)。另外,从端元组分的变化来看,两个泥区柱样 N1 和 N2 的细端元组分 EM2 的含量大致相当,分别为 45.57% 和 44.28%;但柱样 N2 的粗端元组分(EM3)的含量(39.13%)大于柱样 N1(30.35%)。另外,柱样 N2 的 EM1 组分含量(16.59%)小于柱样 N1(24.07%)。这可能是由于跨锋面沉积物的粗颗粒组分在北黄海西部泥区沉降,而细颗粒组分又被输运至辽东半岛东岸泥区,导致柱样 N2 的粗端元组分含量更高。由此可见,虽然两个泥区的沉积物具有同源性,但由于动力分选作用,改变了沉积物的组成。冬季风暴越强,所导致的跨锋面沉积物越粗^[49];因此,EM3 组分可以较好地指示山东半岛北岸泥区沉积物跨锋面输运强度的变化,其含量的变化可能反映冬季风暴的强度变化。

从北黄海西部和辽东半岛东岸泥区来看,二者均为双峰分布,但 N4 柱样细峰更为明显,而粗端元组分(EM3)的粒径分布范围明显区别于柱样 N1 和 N2。这说明柱样 N4 粗端元组分与柱样 N1 和 N2 来源不同,其可能来源于鸭绿江及辽东半岛东岸中小河流。从柱样 N4 与 N2 的细端元组分看,二者的粒径分布范围较为一致,表明二者具有同源性。但从北黄海西部泥区转运而来的跨锋面输运沉积物,多为细颗粒组分,从而导致柱样 N4 的细端元组分含量(82.33%)大于柱样 N2(60.87%)。数值模拟结果也显示^[49],在冬季风暴作用下,渤、黄海水位发生低频波动,北部水位降低,而南部水位增高;冬季风暴松弛阶段,黄海暖流增强,从山东半岛北岸跨锋面输运而来的细颗粒组份物质,能够在黄海暖流的输运下进入辽东半岛东岸。因

此,柱样 N4 的细端元组分(EM1 和 EM2)的变化又与黄海暖流息息相关,可用来指示黄海暖流的强度变化。

5.2 跨锋面物质输运强度的年代际变化及主控因素

天气尺度上,山东半岛北岸跨锋面物质输运由冬季风暴触发;但在年际/年代际尺度上,其强度变化又反映了冬季风暴与黄海暖流间的相互博弈,体现了二者的综合影响。从沉积物供给角度来看,山东半岛北岸泥区和北黄海西部泥区沉积物来源于黄河,辽东半岛东岸泥区沉积物大部分来源于黄河物质的远端输运。但近年来,人类活动影响下黄河入海沉积物的通量和粒径均发生了显著变化^[50],这可能也会对端元组分的含量变化产生影响。本文的研究时段为百年时间尺度,而黄河入海输沙量自 20 世纪 80 年代快速减少^[51–52]。因此,本文从 1900–1979 年(受自然因素影响)和 1980–2020 年(受人类活动影响)两个时间段,讨论山东半岛北岸跨锋面物质输运强度的年际/年代际变化。

1900–1979 年,在东亚冬季风和黄海暖流共同影响下,北黄海西部泥区的粗端元组分和辽东半岛东岸泥区的细端元组分存在两种变化模式,即同向变化和反向变化(图 4e 和图 4f)。当冬季风暴和黄海暖流同步增强或减弱时(同向变化),北黄海西部(柱样 N2)和辽东半岛东岸泥区(柱样 N4)的端元组分含量也相应的增加或减少,如 1950–1956 年。而当冬季风暴和黄海暖流的强度变化呈反向时,柱样 N2 和 N4 的端元组分含量变化则相对复杂。在冬季风较强,而黄海暖流较弱时,柱样 N2 的粗端元组分含量较高,显示山东半岛北岸物质跨锋面输运到强度增强;而柱样 N4 的细端元组分含量较少,说明输运到辽东半岛东岸泥区的跨锋面物质减少,例如 1930–1939 年和 1957–1968 年。当冬季风较弱,而黄海暖流增强时,柱样 N2 和 N4 的端元组分含量出现与上述相反的变化趋势,如 1900–1929 年、1940–1949 年和 1969–1979 年。由此可见,在年际/年代际时间尺度上,山东半岛北岸跨锋面的沉积物从北黄海西部到辽东半岛东岸的输运过程对冬季风暴和黄海暖流有着不同的响应机制。

为进一步研究跨锋面物质输运对冬季风暴和黄海暖流的响应机制,本文分别将柱样 N2 粗端元组分(EM3)和柱样 N4 细端元组分(EM1 和 EM2)与东亚冬季风和黄海暖流进行小波交叉谱分析,以进一步探讨上述两个过程的主控机制。结果显示,柱样 N2 粗端元组分(EM3)与东亚冬季风在 1900–1960 年呈现出周期为 32 a 的共振关系,二者的相关性在周期内较强,且在 1900–1936 年通过了 95% 的显著性检验(图 4a)。这说明在年际/年代际尺度上,冬季风暴对山东半岛

北岸的跨锋面输运强度的影响更为显著,且粗端元组分(EM3)对东亚冬季风强度的变化更为敏感。柱样 N4 细端元组分(EM1 和 EM2)与黄海暖流在 1900–1960 年呈现出周期为 32 a 的共振关系,二者的相关性在周期内较强,且在 1900–1940 年通过了 95% 的显著性检验(图 4b),这反映了黄海暖流强度更能影响跨锋面物质从北黄海西岸到辽东半岛东岸的输运过程,且细端元组分(EM1 和 EM2)对黄海暖流强弱的变化更为敏感。

受人类活动影响,1970 年以后的黄河入海输沙量呈现减少的趋势(图 4g)^[51]。柱样 N2 的粗端元组分(EM3)和柱样 N4 的细端元组分(EM1 和 EM2)自 1980 年才开始分别出现增加和减少的趋势(图 4e 和图 4f),具有 10 a 的滞后期。这可能是由于,黄河三角洲具有丰富的细颗粒沉积物储备,即使流域物源供给减少的情况下,仍可为细颗粒物质的远端输运提供充足的物源;另一方面,沉积物从黄河口输运到北黄海西岸和辽东半岛东岸,也需要一定的时间,上述两种因素可能导致两个泥区的沉积物对黄河入海输沙量减少的响应在时间上存在滞后。东海内陆架泥区的研究也表明,其南部沉积物粒度对长江入海输沙量的响应在 10 年的尺度上也存在滞后期^[53]。通过对 1980 年后沉积物端元组分和黄河输沙量进行相关分析,发现黄河年入海输沙量和柱样 N2 粗端元组分含量(EM3)的相关系数为 $-0.40(p<0.01)$,但与柱样 N4 细端元组分(EM1 和 EM2)的相关系数达到了 $0.59(p<0.01)$ 。这说明,辽东半岛东岸泥区的沉积物组分对黄河入海输沙量减少的响应更加强烈,1980 年后柱样端元组分的变化和黄河年输沙量的减少有关。之前的研究已经表明,黄河输沙量的减少导致山东半岛沿岸泥区的沉积物粒度粗化^[54];而本文的研究进一步证明,北黄海西部泥区以至于更加遥远的辽东半岛东岸泥区也对由人类活动引发的黄河沉积物入海通量减少产生了沉积响应。

综上所述,黄河远端泥北支沉积物粒度组分的变化很好地记录了自然过程和人类活动的双重影响:1900–1979 年间,北黄海西部到辽东半岛东岸泥区粒度敏感组分的变化反映了自然因素(东亚冬季风和黄海暖流)的变化;而 1980–2020 年,受人类活动影响的沉积物供给变化,掩盖了自然过程的信号变化,导致上述两个泥区的沉积物敏感端元组分含量的变化,更多地体现了黄河入海输沙量减少的信号,甚至掩盖了气候变化信息。而上述结论也进一步揭示,沉积物粒度及其组分变化是反映气候变化和人类活动双重影响下陆架泥区沉积环境演化的有效指标,但不同区

域沉积物粒度对不同影响因素变化的响应机理和响应强度有着显著的差异,具有显著的区域沉积效应。例如,在自然变化主导阶段,北黄海西部泥区的粗端元组分变化可反映冬季风暴强度变化,但辽东半岛东岸泥区的细端元组分变化与冬季风暴并无直接关系;而 1980 年代以来,人类活动更是直接导致了黄河远端泥北支沉积物粒度组分粗化趋势。因此,在使用粒度指标进行沉积环境演化分析过程中,一定要根据不同泥区的沉积物来源和沉积动力环境特点,立足于过程–产物间的关系,结合器测数据验证粒度指标指示古气候和古环境变化的可行性,在厘清物源、动力和冬季风暴关系的基础上,正确使用粒度指标。

6 结论

百年时间尺度上,黄河远端泥北支沉积物不同组分对不同动力过程的敏感程度存在显著差异:沉积物的粗端元组分(EM3)对冬季风暴的变化更为敏感;而细端元组分(EM1+EM2)的含量变化与黄海暖流强度变化更为相关。沉积物组分不同阶段变化存在两个主导因素:1900–1979 年,黄河远端泥北支粒度组分反映了自然因素的变化;而 1979–2020 年主要受黄河入海输沙量的减少主导,人类活动信号掩盖了自然因素的影响。

从年际/年代际变化看,沉积物组分对自然因素变化的响应机理存在区域差异:粗端元组分变化可很好地反映山东半岛北岸跨锋面物质输运强度的变化,受冬季风暴强度变化所主导;细端元组分变化与沉积物从北黄海西部泥区到辽东半岛东岸泥区的输运过程更为密切,主要受控于黄海环流的强度变化。这也导致不同泥区粒度端元组分对气候变化的响应具有显著的区域沉积效应:当东亚冬季风强盛,北黄海西部泥区的沉积物粗颗粒组分增多,而黄海暖流增强则有利于将更多细颗粒组分输运至辽东半岛东岸泥区;此外,辽东半岛东岸泥区的细颗粒组分对 20 世纪 80 年代以后的入海输沙量减少具有更强烈的响应。

上述结论显示,反演古气候和古环境变化时,应结合器测数据验证粒度指标的可行性,在厘清不同泥区沉积物粒度端元组分对特定海洋动力的指示意义基础上,谨慎并正确地使用粒度指标。

致谢: 南京大学地理与海洋科学学院吕纪轩、张硕、曲玉冰以及舒卓参与了样品采集工作,刘胜璟在室内分析实验中提供了帮助,刘焘在绘图方面提供了帮助,审稿专家为本文提出了宝贵的修改意见,在此一并感谢!

参考文献:

- [1] 杨作升, 郭志刚, 王兆祥, 等. 黄东海陆架悬浮体向其东部深海区输送的宏观格局[J]. 海洋学报, 1992, 14(2): 81–90.
Yang Zuosheng, Guo Zhigang, Wang Zhaoxiang, et al. Basic pattern of transport of suspended matter from the Yellow Sea and East China Sea to the eastern deep seas[J]. Haiyang Xuebao, 1992, 14(2): 81–90.
- [2] Hu Bangqi, Yang Zuosheng, Zhao Meixun, et al. Grain size records reveal variability of the East Asian winter monsoon since the Middle Holocene in the Central Yellow Sea mud area, China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(10): 1656–1668.
- [3] Xiao Shangbin, Li Anchun, Liu J P, et al. Coherence between solar activity and the East Asian winter monsoon variability in the past 8 000 years from Yangtze River-derived mud in the East China Sea[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 237(2/4): 293–304.
- [4] Xiang Rong, Yang Zuosheng, Saito Y, et al. East Asia winter monsoon changes inferred from environmentally sensitive grain-size component records during the last 2 300 years in mud area southwest off Cheju Island, ECS[J]. *Science in China Series D*, 2006, 49(6): 604–614.
- [5] Wang Linmiao, Li Guangxue, Gao Fei, et al. Sediment records of environmental changes in the south end of the Zhejiang-Fujian coastal mud area during the past 100 years[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2014, 32(4): 899–908.
- [6] Zhao Shaohua, Cai Feng, Liu Zhifei, et al. Disturbed climate changes preserved in terrigenous sediments associated with anthropogenic activities during the last century in the Taiwan Strait, East Asia[J]. *Marine Geology*, 2021, 437: 106499.
- [7] Zhou Xin, Yang Wenqing, Xiang Rong, et al. Re-examining the potential of using sensitive grain size of coastal muddy sediments as proxy of winter monsoon strength[J]. *Quaternary International*, 2014, 333: 173–178.
- [8] Li Dongling, Li Tiegang, Jiang Hui, et al. East Asian winter monsoon variations and their links to arctic sea ice during the last millennium, inferred from sea surface temperatures in the Okinawa Trough[J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2018, 33(1): 61–75.
- [9] Yang Kaiqing, Hua Wei, Hu Qin. A multi-model analysis of the East Asian monsoon changes in the medieval climate anomaly and Little Ice Age[J]. *International Journal of Climatology*, 2020, 40(12): 5084–5097.
- [10] Wang Haoyin, Zhang Lanlan, Xiang Rong, et al. Holocene paleoenvironmental changes in mud area southwest off Cheju Island, East China Sea: evidence from benthic foraminiferal assemblages and stable isotope records[J]. *Marine Geology*, 2020, 429: 106319.
- [11] Zhang Kaidi, Li Anchun, Liu Xiting, et al. Heavy mineral record from the East China Sea inner shelf: implications for provenance and climate changes over the past 1 500 years[J]. *Continental Shelf Research*, 2021, 226: 104488.
- [12] Tu Luyao, Zhou Xin, Cheng Wenhan, et al. Holocene East Asian winter monsoon changes reconstructed by sensitive grain size of sediments from Chinese coastal seas: a review[J]. *Quaternary International*, 2017, 440: 82–90.
- [13] Shi Yong, Xu Xiaomei, Sheng Hui, et al. Neglected role of continental circulation in cross-shelf sediment transport: implications for paleoclimate reconstructions[J]. *Marine Geology*, 2022, 443: 106703.
- [14] 舒卓, 高建华, 石勇, 等. 山东半岛北岸跨锋面物质运输对辽东半岛东岸沉积有机质含量及来源的影响[J]. 海洋通报, 2022, 41(1): 50–60.
Shu Zhuo, Gao Jianhua, Shi Yong, et al. The influence of cross-front sediment transport in north coast of Shandong Peninsula on the content and origin of sedimentary organic matter in east coast of Liaodong Peninsula[J]. *Marine Science Bulletin*, 2022, 41(1): 50–60.
- [15] 李凡, 姜秀珩, 宋怀龙. 晚更新世以来黄河、长江入海泥沙对南黄海沉积作用的影响[J]. 海洋科学集刊, 1993(1): 61–72.
Li Fan, Jiang Xuhang, Song huailong. Influence of the Huanghe and Changjiang rivers sediment loads on South Yellow Sea sedimentation since Late Pleistocene[J]. *Bulletin of Marine Science*, 1993(1): 61–72.
- [16] Liu J P, Milliman J D, Gao Shu, et al. Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 2004, 209(1/4): 45–67.
- [17] 王伟. 北黄海表层沉积物粒度分布特征及其对沉积环境的指示[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2008.
Wang Wei. Distribution of surface sediments and sedimentary environment in the North Yellow Sea[D]. Qingdao: The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [18] 石勇, 高建华, 刘强, 等. 陆架环流作用下的北黄海中北部细颗粒物运输[J]. 海洋学报, 2019, 41(4): 53–63.
Shi Yong, Gao Jianhua, Liu Qiang, et al. Fine sediment transport in north-central of Yellow Sea: the role of continental shelf circulation[J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41(4): 53–63.
- [19] Shi Y, Gao Jianhua, Sheng Hui, et al. Cross-front sediment transport induced by quick oscillation of the Yellow Sea warm current: evidence from the sedimentary record[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(1): 226–234.
- [20] Yang Z S, Liu J P. A unique Yellow River-derived distal subaqueous delta in the Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 2007, 240(1/4): 169–176.
- [21] 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]. 海洋与湖沼, 2000, 31(6): 604–615.
Cheng Peng, Gao Shu. Net sediment transport patterns over the northwestern Yellow Sea, based on grain size trend analysis[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31(6): 604–615.
- [22] 符文侠, 贾锡钧, 魏成凯, 等. 河流泥沙对辽东半岛海岸的填充作用[J]. 黄渤海海洋, 1984, 2(2): 49–55.
Fu Wenxia, Jia Xijun, Wei Chengkai, et al. Filling effect of discharge silt on the coast in the Liaodong Peninsula[J]. *Journal of Oceanology*

- graphy of Huanghai & Bohai Seas, 1984, 2(2): 49–55.
- [23] 李光天, 符文侠, 贾锡钧. 辽东潮间浅滩的综合特征[J]. *地理学报*, 1986, 41(3): 262–273.
Li Guangtian, Fu Wenxia, Jia Xijun. The comprehensive characteristic of the Liaodong Peninsular tidal flat[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1986, 41(3): 262–273.
- [24] Chen Xiaohui, Li Tiegang, Zhang Xunhua, et al. A Holocene Yalu River-derived fine-grained deposit in the southeast coastal area of the Liaodong Peninsula[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2013, 31(3): 636–647.
- [25] 李艳. 北黄海末次冰消期以来沉积特征及物源环境指示[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2011.
Li Yan. Sedimentary characteristics and implication to provenance and sedimentary environment since the Last Deglaciation in the North Yellow Sea[D]. Qingdao: The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [26] 石勇. 北黄海西部细颗粒物质的跨锋面输运及其沉积环境效应[D]. 南京: 南京大学, 2020.
Shi Yong. Cross-front transport of fine sediment in the western North Yellow Sea and its sedimentary effects[D]. Nanjing: Nanjing University, 2020.
- [27] Goldberg E D, Koide M. Rates of sediment accumulation in the Indian Ocean[M]//Earth Science and Meteoritics. Amsterdam: NorthHolland Publishing Company, 1963: 90–102.
- [28] Paterson G A, Heslop D. New methods for unmixing sediment grain size data[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16(12): 4494–4506.
- [29] Carton J A, Giese B S, Grodsky S A. Sea level rise and the warming of the oceans in the Simple Ocean Data Assimilation (SODA) ocean reanalysis[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2005, 110(C9): C09006.
- [30] Carton J A, Giese B S. A reanalysis of ocean climate using Simple Ocean Data Assimilation (SODA)[J]. *Monthly Weather Review*, 2008, 136(8): 2999–3017.
- [31] Giese B S, Ray S. El Niño variability in simple ocean data assimilation (SODA), 1871–2008[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C2): C02024.
- [32] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730): 1999–2049.
- [33] Bell B, Hersbach H, Berrisford P, et al. ERA5 monthly averaged data on single levels from 1950 to 1978 (preliminary version)[EB/OL]. (2022–08–03)[2022–08–04]. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means-preliminary-back-extension?tab=overview>.
- [34] Zhou W, Wang X, Zhou T J, et al. Interdecadal variability of the relationship between the East Asian winter monsoon and ENSO[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2007, 98(3): 283–293.
- [35] Wu Bingyi, Wang Jia. Winter arctic oscillation, siberian high and East Asian winter monsoon[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(19): 1897.
- [36] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(3): 437–472.
- [37] 林振山, 邓自旺. 子波气候诊断技术的研究[M]. 北京: 气象出版社, 1999.
Lin Zhenshan, Zheng Ziwang. Studies on Technique of Wavelet Transform in Climate Diagnostics[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999.
- [38] 程鹏. 北黄海细颗粒物质的沉积特征与输运过程[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2000.
Cheng Peng. Sediment characteristics and transport processes of fine-grained material over the Northern Yellow Sea[D]. Qingdao: The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2000.
- [39] 王桂芝. 北黄海西部泥质沉积特征与成因探讨[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2001.
Wang Guizhi. Sedimentary characteristics and mechanism of mud deposits in the Northern Yellow Sea[D]. Qingdao: The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2001.
- [40] 郭世鑫. 近百年来北黄海浮游植物生产力和种群结构变化的生物标志物记录及影响因素[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
Guo Shixin. Biomarker records of phytoplankton productivity and community structure changes of the North Yellow Sea and its influencing factors over the last 100 years[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [41] 黄荣辉, 刘永, 皇甫静亮, 等. 20世纪90年代末东亚冬季风年代际变化特征及其内动力成因[J]. *大气科学*, 2014, 38(4): 627–644.
Huang Ronghui, Liu Yong, Huangfu Jingliang, et al. Characteristics and internal dynamical causes of the interdecadal variability of East Asian winter monsoon near the Late 1990s[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 38(4): 627–644.
- [42] 韩雪, 蔡怡, 陈幸荣, 等. 渤海冬季海温异常的时空分布特征及影响因子分析[J]. *热带海洋学报*, 2014, 33(5): 1–12.
Han Xue, Cai Yi, Chen Xingrong, et al. Analysis of temporal and spatial distribution characteristics of winter SST anomalies in the Bohai Sea and Yellow Sea and their influencing factors[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2014, 33(5): 1–12.
- [43] Lin Chuanlan, Su Jilan, Xu Bingrong, et al. Long-term variations of temperature and salinity of the Bohai Sea and their influence on its ecosystem[J]. *Progress in Oceanography*, 2001, 49(1/4): 7–19.
- [44] Wei Hao, Shi Jie, Lu Youyu, et al. Interannual and long-term hydrographic changes in the Yellow Sea during 1977–1998[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2010, 57(11/12): 1025–1034.

- [45] 罗晓凡, 魏皓, 袁承仪. 利用卫星资料分析黄海海表温度的年际与年代际变化[J]. 中国海洋大学学报, 2012, 42(10): 19–25.
Luo Xiaofan, Wei Hao, Yuan Chengyi. Inter-annual and decadal variations of sea surface temperature in the Yellow Sea by satellite data[J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(10): 19–25.
- [46] Yuan Chengyi, Wei Hao, Luo Xiaofan, et al. Linkage between winter temperatures in the Yellow Sea and atmospheric circulation indices[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2019, 18(2): 261–270.
- [47] Li Yan, Mu Lin, Wang Qingyuan, et al. High-quality sea surface temperature measurements along coast of the Bohai and Yellow seas in China and their long-term trends during 1960–2012[J]. *International Journal of Climatology*, 2020, 40(1): 63–76.
- [48] Cai Rongshuo, Tan Hongjian, Kontoyiannis H. Robust surface warming in offshore China seas and its relationship to the East Asian monsoon wind field and ocean forcing on interdecadal time scales[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(22): 8987–9005.
- [49] Xu Xiaomei, Gao Jianhua, Shi Yong, et al. Cross-front transport triggered by winter storms around the Shandong Peninsula, China[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 975504.
- [50] Wu Xiao, Wang Houjie, Bi Naishuang, et al. Climate and human battle for dominance over the Yellow River's sediment discharge: from the Mid-Holocene to the Anthropocene[J]. *Marine Geology*, 2020, 425: 106188.
- [51] Wang Houjie, Yang Zuosheng, Saito Y, et al. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950–2005): impacts of climate change and human activities[J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 57(3/4): 331–354.
- [52] Wang Shuai, Fu Bojie, Piao Shilong, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 38–41.
- [53] Gao Jianhua, Shi Yong, Sheng Hui, et al. Rapid response of the Changjiang (Yangtze) River and East China Sea source-to-sink conveying system to human induced catchment perturbations[J]. *Marine Geology*, 2019, 414: 1–17.
- [54] 杨立建, 马小川, 贾建军, 等. 近百年来黄河改道及输沙量变化对山东半岛泥质楔沉积物粒度特征的影响[J]. 海洋学报, 2020, 42(1): 78–89.
Yang Lijian, Ma Xiaochuan, Jia Jianjun, et al. Impacts of channel shifts and interannual sediment load reducing of the Yellow River on the grain size characteristics of sediments in the Shandong mud wedge over the past 100 years[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(1): 78–89.

Variations in grain size composition and regional sedimentary effects in the north branch of Huanghe River distal mud induced by climate changes and human activities

Yang Guang¹, Ren Chunyu¹, Shi Yong¹, Xu Xiaomei¹, Gao Jianhua¹

(1. Key Laboratory of Coast and Island Development of the Ministry of Education, School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Paleoclimate and paleoenvironment reconstruction based on shelf mud deposits remain controversial due to the complexity of coastal dynamic conditions. In this paper, three sediment cores distributed along the sediment transport path in the North Yellow Sea were collected, and the sediment grain size composition, end member, winter storms and Yellow Sea Warm Current strength variation were also analyzed. Based on above analysis, the response mechanism and intensity of different sediment grain size end member to winter storms and Yellow Sea Warm Current were discussed, and sedimentary effect in different regions caused by the above changes was also revealed. The results show that sediment composition in the north branch of Huanghe River distal mud is dominated by the natural condition and human activity over the past 100 years, respectively. Due to the impact of human activities on the sediment flux and composition of the Huanghe River into the sea began to enhance since 1980, and the natural evolution information was destroyed. In addition, through comparing sediment end member of different cores along the sediment transport pathway, the discrepancy in response mechanism and intensity of different end member to winter storms and the Yellow Sea Warm Current were observed before 1980, which reflected significant regional sedimentation effect. Further analysis demonstrated that, the coarse-grained end member is dominated by the winter storm, reflecting intensity of cross-front transport from the north Shandong Peninsula; and the fine-

grained end member is controlled by the Yellow Sea Warm Current, representing the long distance transport from the offshore mud patch of the western North Yellow Sea to the eastern coast of the Liaodong Peninsula. Above conclusions indicated that, the sediment grain size is a robust tool for paleoclimate and paleoenvironment reconstruction; however, the utility of sensitive grain size should be based on sediment source and the characteristics of the sediment hydrodynamic environment analysis, and selection of the sensitive grain size and its implication should be careful.

Key words: North Yellow Sea; grain size; winter storm; Yellow Sea Warm Current; cross-front transport