

近 60 年来南黄海沉积物高分辨率敏感粒级对东亚冬季风的响应

高星华^{1,2}, 李广雪^{1,2*}, 张海啟^{1,3}, Dada Olusegun A^{1,4}, 刘世东^{1,2},
陈中亚^{1,2}, 李亨健^{1,2}, 王琳森^{1,5}, 刘 玲²

(1 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100; 2 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100;
3 中国地质调查局发展中心, 北京 100011; 4 联邦理工大学海洋科学与技术学院, 阿库雷 340252, 尼日利亚;
5 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

摘 要: 对南黄海中部泥质区 F306 柱状样的沉积物进行分析, 运用粒径—标准偏差法, 得出该孔敏感粒级组分为 $23.10 \sim 65.30 \mu\text{m}$ ($5.44\Phi \sim 3.94\Phi$), 其粒级的含量 $15.6\% \sim 22.3\%$, 平均粒径 $38.5 \sim 41.4 \mu\text{m}$ ($4.70\Phi \sim 4.59\Phi$), 证明敏感粒级可以作为东亚冬季风的高分辨率替代指标, 进一步阐明了敏感粒级作为东亚冬季风替代指标在更高分辨率上的可行性。根据敏感粒级沉积记录, 在 1950—1986 年期间, 将东亚冬季风分为强—弱—强 3 个阶段, 指示了该阶段东亚冬季风存在近 10 年的周期。1986/1987 为近 60 多年来东亚冬季风由强变弱的转折点, 与东亚气候变化具有较好的对应关系, 首次在中国东部海域中记录了此逆转事件, 认为 1986 年后沉积物敏感粒级的变粗可能与长江物源变粗、东亚冬季风的减弱以及夏季风增强有关。

关键词: 南黄海泥质区; 敏感粒级; 东亚季风; 高分辨率; 长江输沙

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2016.08001

黄海是冰后期海侵形成的半封闭型陆架海^[1,2], 接受了长江、黄河、韩国河流以及苏北地区大量的陆源物质^[3-6], 由于受到黄海暖流和中韩沿岸流的影响^[7], 海底沉积环境变化较大^[8]。黄海的环流系统主要是由黄海暖流和黄海沿岸流组成, 并与朝鲜沿岸流和辽东沿岸流共同构成了一个有机的环流系统^[3], 由此形成了以细颗粒为主的黄海中部环流沉积体系(图 1)。南黄海沿岸

流主要为山东半岛沿岸流和苏北沿岸流; 黄海暖流是由偏北季风诱导所产生的一种补偿流, 属于弱流, 平均流速仅 $4 \sim 10 \text{ cm/s}$ ^[9], 风场在一定程度上控制着黄海暖流的强弱程度和向北伸展的范围。

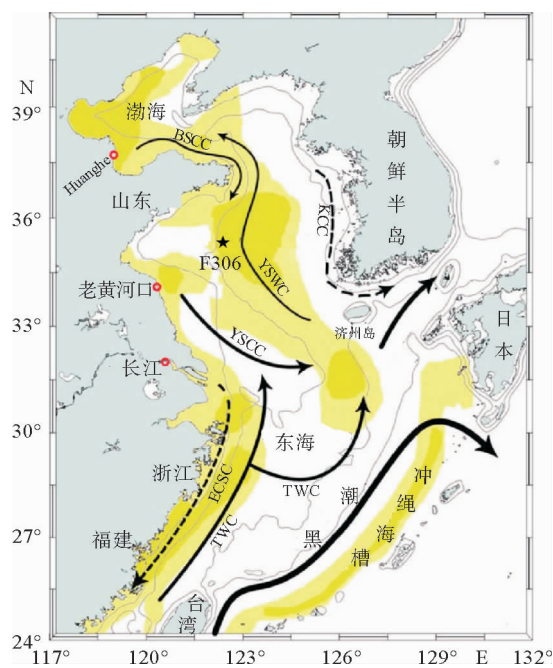
中国东部陆架海泥沙在风浪导致的底应力作用下会再悬浮^[10], Wang 等^[11]研究表明, 冬季风暴造成的海底强烈的切应力是导致苏北浅滩沉积物再悬浮的主要因素。Hoshika 等^[12]指出东亚冬季风是造成冬、夏季悬浮物水平输运方向差异的主要原因, 大风作用下表现出海浪对悬浮物浓度的影响。从冬季开始, 输运到黄海中部陆架区的苏北浅滩泥沙在黄海暖流作用下向黄海中部泥质区输运。夏季, 苏北浅滩泥沙在东向离岸流的作用下可以直接输运到黄海中部泥质区。黄海暖

收稿日期: 2016-03-28

基金项目: 国家自然科学基金重点基金(41030856); 中国地质调查专项(GZH201100202); 山东省泰山学者建设工程专项

作者简介: 高星华(1991—), 男, 在读硕士, 主要从事海洋沉积学方面的研究工作. E-mail: gaoxinghua321@163.com

*** 通讯作者:** 李广雪(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋地质学方面的研究工作. E-mail: estuary@ouc.edu.cn



TC: 对马暖流; TWC: 台湾暖流; ECSC: 东海沿岸流;
YSCC: 黄海沿岸流; CDW: 长江冲淡水; YSWC: 黄海暖流;
KCC: 朝鲜沿岸流; BSCC: 渤海沿岸流

图 1 研究区地理位置及中国东部陆架
环流系统图 (据文献[10]改绘)

Fig. 1 The map showing location of core F306 and
the winter current circulation in the Yellow Sea and
East China Sea (modified from reference[10])

流是进入南黄海的外海流系,高悬浮体浓度水体随着黄海沿岸流扩散至该泥质区。据统计,黄海暖流携带运输的细粒物质大约为 $3 \times 10^6 \text{ t/a}$ [13]。

黄、东海海域沉积物的物源判识指标主要集中于矿物、元素及同位素、环境磁学、生物标志物等几个方面 [14,15]。敏感粒级是对沉积环境响应最敏感的粒度组分,其平均粒径以及含量的变化可以反映沉积环境及物源的变化。敏感粒级作为冬、夏季风的替代指标已运用到东亚季风的演化研究中并取得较多的研究成果 [16]。肖尚斌等 [16]、王顺华等 [17] 分别利用 $<20 \mu\text{m}$ 、 $<28 \mu\text{m}$ 的细粒组粒级组分作为替代指标,较好地反演了东亚冬季风的演化和强度。向荣等 [18] 对济州岛西南泥质区 B2 孔进行组分分离,敏感粒级组分为 $10.5 \sim 65.6 \mu\text{m}$,其粒级组分含量和平均粒径能够很好的反映 2.3 ka BP 以来东亚季风强弱变化,表明泥质沉积区沉积物粒度能够作为环境演变的替

代指标。Zhou 等 [19] 使用冬半季温度作为冬季风指标,将敏感粒级与冬半季温度对比,得出高温期对应较细粒径,冰期对应较粗颗粒,指出敏感粒级可以反映东亚冬季风的强弱。

沉积物的变化可以很好地记录环境的变化,东亚冬季风变化明显受到全球气候变化的影响。1986/1987 年为东亚冬季风由强向弱转化的重要转折点,中外的学者大多数都同意该时期冬季风的减弱 [20],包括冬季西伯利亚高压的减弱,认为这均可能是气候变暖的结果。20 世纪 80 年代中期以来东亚冬季风偏弱可能是由于北极涛动的显著增强造成的 [21]。1986/1987 年东亚冬季风由强变弱也分别在温度、风压变化和硅藻生物等记录中得到验证。但是,由于分辨率以及测年精度等问题,该转折点尚未在沉积物粒度记录中得到相应记录。

本文通过分析南黄海陆架泥质沉积区(图 1)敏感粒级平均含量和粒径,试图证明敏感粒级能够很好地反映东亚季风的变化,尤其在短时间尺度上。同时,通过分析高分辨率沉积记录,探讨沉积记录对 1986/1987 年东亚冬季风气候逆转的响应。

1 材料和方法

研究所用的柱状样 F306 是 2007 年由“东方红 2 号”于南黄海泥质区采样得到,该钻孔位于南黄海泥质区西部,站位坐标为 $34^{\circ}59'47.65''\text{N}$ 、 $122^{\circ}30'42.05''\text{E}$,长 37 cm,采样水深为 64 m。

在实验室内以 1 cm 为间隔进行取样,共获得 35 个样品并进行粒度分析。在前处理过程中加入 10% H_2O_2 溶液去除有机质,然后进行上机测试,在青岛海洋地质研究所粒度实验室使用英国 Malvern2000 型激光粒度仪,测量范围为 $0.02 \sim 2000 \mu\text{m}$,该仪器的粒级分辨率为 0.01Φ ,重复测量的相对误差 $<3\%$ 。

使用 ^{210}Pb 测年法,在 37 cm 的柱状样中每隔 2 cm 进行取样,称取样品放于烧杯中,加入盐酸和柠檬酸,浸取后离心,并提取上层清液,随后加入示踪剂 ^{208}Po ,做 α 谱测试,在中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室完成测试。

2 结果

2.1 测年结果和沉积速率

沉积柱中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度随深度的变化见图 2。根据曲线求得平均速率,避免单个异常点引起的测量准确值的改变。从图中可以看出, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 随深度呈指数衰减,相关系数为 $R^2=0.581$ 。 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 变化范围为 $57.29\sim 226.57\text{ Bq/kg}$,平均值为 122.81 Bq/kg 。沉积物的平均沉积速率 $S=-\lambda/m$, λ 是 Pb 的衰变常数($0.03114/\text{a}$), m 代表图 2 直线的斜率。计算得出该柱的沉积速率为 0.65 cm/a 。

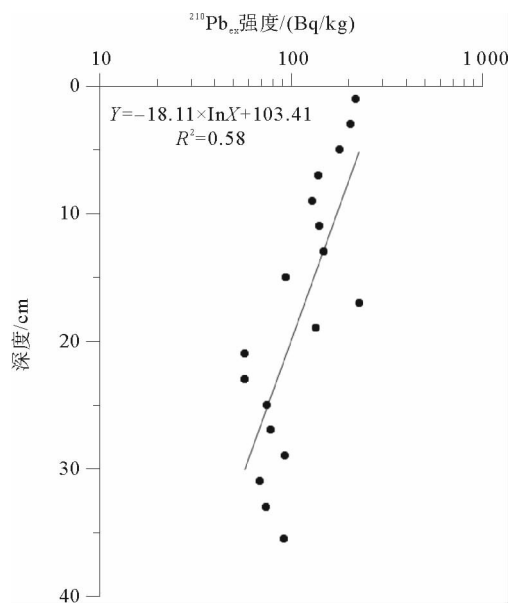


图 2 F306 孔 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 剖面

Fig. 2 Profiles of excess ^{210}Pb activity in core F306

2.2 粒度特征

沉积物粒度的频率分布曲线可以用来解释沉积环境变化^[22],提供关于沉积物组分以及分布类型的信息^[23]。从图 3 看出,该孔主要由粉砂组成,且无明显的沉积间断。砂、粉砂、黏土含量总体变化不大,平均含量分别是 4.76% 、 63.41% 、 31.84% 。钻孔的平均粒径、标准偏差、偏态的曲线变化趋势具有较好的一致性。从底到顶,平均粒径波动变化反映了沉积环境中介质动能的波动性。

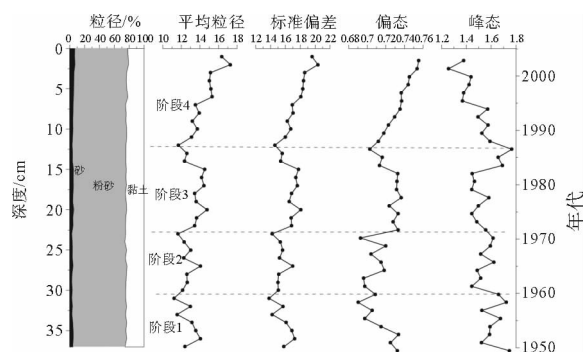


图 3 F306 沉积物组成以及粒径参数

Fig. 3 Sediment composition and grain-size parameters in core F306

相应地,粒径频率分布曲线表现为明显的双峰(图 4),其中以粒径较细的组分对应的峰为主,另一个粒度较粗的组分对应的峰呈较小的波动变化。说明沉积动力相对较为稳定,主要对应于涡旋控制下的细粒沉积。较粗粒径对应的峰波动变化,指示了沉积粒度随沉积环境的波动而变化,表明本研究区沉积物在不同的沉积动力下混合形成。因此,可以从各组分中分离出含量和粒径变化较大的各个组分,在此基础上讨论每个粒级组分对环境的沉积响应^[14]。同时,沉积物的粒度变化特征也可以反映出物源的变化。

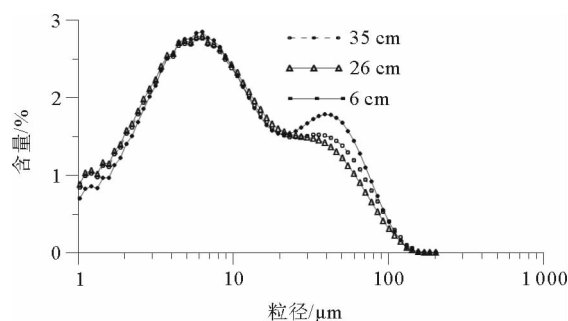


图 4 F306 孔粒径频率分布曲线

Fig. 4 Grain-size distribution curves of core F306 sediments at different depths

根据该柱状样的粒度特征,从下至上分为 4 个阶段。阶段 1:37~30 cm,沉积物平均粒度、标准偏差、偏态均有变小的趋势,说明该段的沉积动力逐渐减弱,沉积物的分选变好;阶段 2:30~22.5 cm,平均粒径、标准偏差、偏态和峰态变化均相对较平稳,说明此阶段的沉积动力相对稳定,在 22.5 cm 处,平均粒径、标准偏差、偏态均出现一

个较小值,而峰态出现一个极大值,粒度分布曲线较尖锐,随后粒径变粗;阶段 3:22.5~12 cm 范围,粒径较粗,标准偏差、偏态也随着变大,沉积动力相应增强,分选变差;阶段 4:12~0 cm,12 cm 处粒径达到一个低值后开始变粗,并呈明显的上升的趋势,沉积动力开始逐渐增强,分选逐渐变大,可能指示了物源的变化。

2.3 敏感粒级组分

依据沉积物所包含的粒度组分和分布范围来追溯沉积物输运过程和沉积环境变化,已被较好地应用于北大西洋^[24]、北太平洋^[25]、阿拉伯海^[26]和中国边缘海^[18,21,27]。本文采用了粒级—标准偏差法,获得 F306 孔样品的每个粒级组分的标准偏差随粒级组分的变化曲线(图 5),较高标准偏差值所对应的粒级即为敏感粒度的众数,其随环境变化最明显。图中 2 个较为明显的峰值分别出现在 $7.49 \mu\text{m}$ (7.06Φ)和 $54.94 \mu\text{m}$ (4.19Φ)。根据曲线变化将沉积物粒径分为 4 个粒度组分,分别为 $< 3.14 \mu\text{m}$ (8.32Φ)、 $3.14 \sim 23.10 \mu\text{m}$ ($8.32\Phi \sim 5.44\Phi$)、 $23.10 \sim 65.30 \mu\text{m}$ ($5.44\Phi \sim 3.94\Phi$)和 $> 65.30 \mu\text{m}$ (3.94Φ)。计算了各粒度组分的粒级含量和平均粒径(图 6)。由于 $> 65.30 \mu\text{m}$ 组分含量极少($< 5\%$),不予讨论。其他 3 个组分的粒级含量均有非常明显的波动变化,其中 $23.10 \sim 65.30 \mu\text{m}$ 和 $3.14 \sim 23.10 \mu\text{m}$ 的粒级明显的呈相反的变化趋势。而从平均粒径随深度的变化来看,只有 $3.14 \sim 23.10 \mu\text{m}$ 的粒

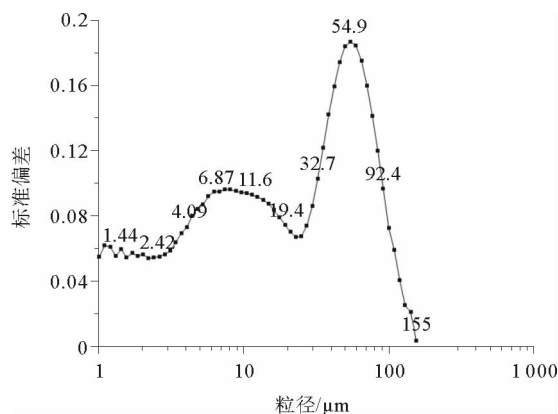


图 5 F306 孔粒级—标准偏差曲线

Fig. 5 Diagram of standard deviation vs. grain-size of core F306

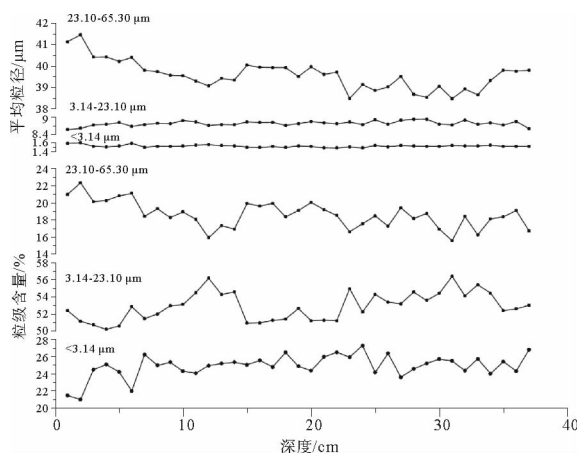


图 6 F306 孔 3 个粒度组分的平均粒径和粒级含量变化

Fig. 6 Variations in mean grain size and contents of three main populations of core F306

级具有较大的变化,其他 2 个组分基本没有粒径变化,可以推断出 $65.30 \sim 23.10 \mu\text{m}$ 的粒级是随沉积环境变化的主要组分,而 $3.14 \sim 23.10 \mu\text{m}$ 和 $< 3.14 \mu\text{m}$ 的含量变化是随着 $23.10 \sim 65.30 \mu\text{m}$ 组分的变化而变化。因此, $23.10 \sim 65.30 \mu\text{m}$ 是引起 F306 孔变化的主要粒级,故判定其为该孔的敏感粒级。该组分的粒度含量变化范围为 $15.6\% \sim 22.3\%$,平均含量 18.6% ,平均粒径波动范围为 $38.5 \sim 41.4 \mu\text{m}$ ($4.70\Phi \sim 4.59\Phi$),平均 $39.5 \mu\text{m}$ (4.66Φ)。

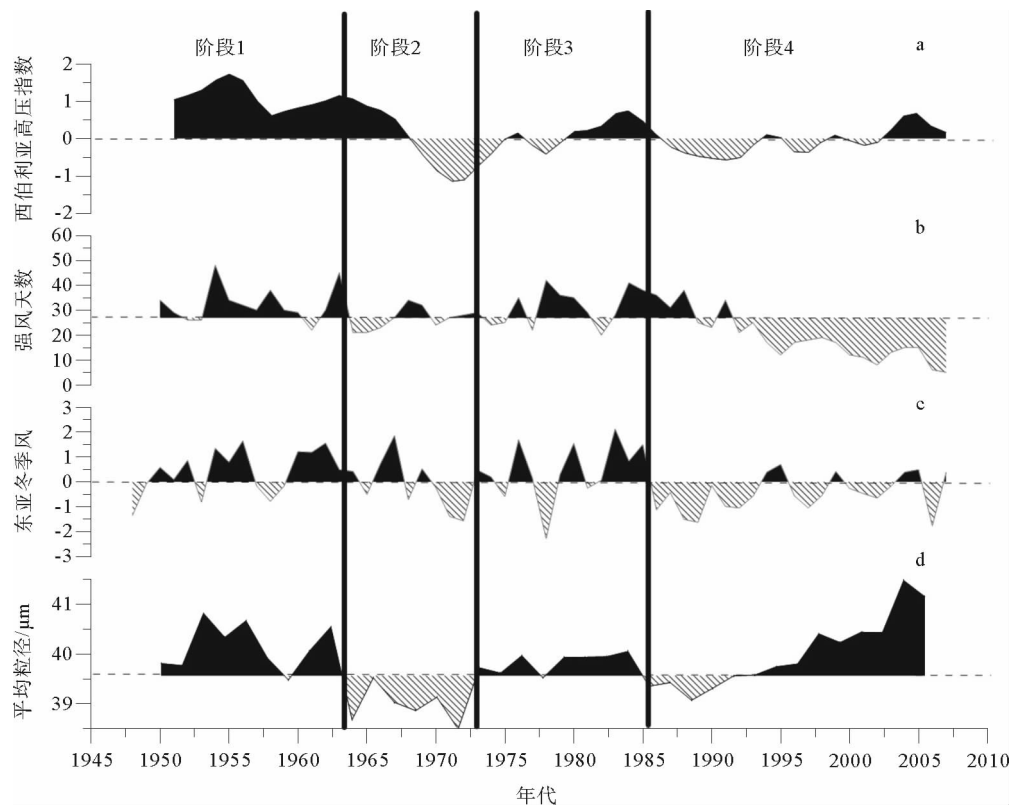
3 分析与讨论

冬季在黄海存在一个显著的跨陆架环流,将苏北浅滩的悬浮泥沙搬运向深海,一部分悬浮体还会随黄海暖流进入黄海中部^[28]。冬季风暴会引起老黄河口海底沉积物发生再悬浮,使冬季悬浮体浓度增大^[3]。冬季强劲的西北风驱动下,黄海沿岸流向东南扩展最远^[29],最远达到 31°N 、 125°E ^[30]。自黄海沿岸至黄海中部泥质区,水体中悬浮体呈现典型的由陆向外海方向输送^[31]。从冬季开始,输运到黄海中部陆架区的苏北浅滩泥沙在黄海暖流作用下向黄海中部泥质区输运。冬季大风过程会削弱沿岸流的沉积作用,但同样也会增强沿岸流的输沙作用;同时由于风速增大导致黄海暖流流速也增大,黄海暖流的沉积作用得到加强^[30]。

南黄海泥质区作为细颗粒物质的“汇”,其沉积物主要来源于老黄河口和长江,同时黄河和韩国周边河流也有一定的贡献。其悬浮体主要受到黄海暖流控制^[9],其强弱程度和向北伸展的范围在很大程度上受风场控制。因此,可以通过泥质区沉积物敏感粒级的变化,反映了东亚冬季风的强弱波动,粗粒度指示了强盛的冬季风,细粒度指示相对较弱的冬季风。

3.1 敏感粒级对东亚冬季风响应

主要选取了距离岩心较近的青岛观测站所得的冬季(12、1、2月)强风出现的天数(强风为:日最大风速 ≥ 10.8 m/s)、西伯利亚高压指数以及东亚冬季风指标作为基准,并将敏感粒级的变化和冬季风强弱对比分析,探讨南黄海泥质区敏感粒级对冬季风的响应情况(图 7)。



(a)西伯利亚高压指数;(b)青岛冬季强风天数;(c)东亚冬季风指标;(d)敏感粒径的平均粒径变化

图 7 敏感粒级平均粒径与东亚冬季风指标对比

Fig. 7 Comparison between mean sensitive grain size of the core and other indicators of East Asian Winter Monsoon

1950—1986 年期间,敏感粒级的平均粒径与东亚冬季风、西伯利亚高压指数、冬季强风天数具有较好的对应关系,期间分为强、弱、强 3 个阶段:1950—1963 年,敏感粒径较粗,对应的西伯利亚高压指数也显示出相对的高值,强风天数也表现较为强劲,此阶段东亚冬季风较强;1963—1973 年,敏感粒径平均粒径较小,所对应的西伯利亚高压指数、东亚冬季风指标、冬季强风天数相对较小,说明了此阶段东亚冬季风较弱;1973—1985 年,敏感粒级的平均粒径变粗,对应的西伯利亚高

压指数、冬季大风天数相对增强,说明了东亚冬季风逐渐增强。

1950 年以后,东亚冬季风存在 9~11 a 的准周期变化^[32]。并且这种准周期变化可能主要受到北太平洋海温年代际变化的影响^[33]。Wu 等^[34]研究结果表明,冬季北极涛动可能影响着冬季西伯利亚高压,进而影响东亚冬季风的强弱变化。本文敏感粒级在 1950—1986 年期间的变化可以看出,明显存在一个近 10 a 的周期波动,验证了东亚冬季风的周期变化在南黄海同样响应。

3.2 1986—2007 年敏感粒级变粗的原因

1986—2007 年期间,敏感粒级的变化与冬季风的温度指标不吻合,甚至出现了与冬季大风呈现反相关关系的情况,同时,该段整体的平均粒径

也相应变粗。结合物源分析认为,此阶段敏感粒级的变化主要受控于物源的变化(图 8)。敏感粒级的平均粒径和粒级含量与长江的输沙平均粒径具有较好的相关关系,而与输沙量具有很好的负相关关系。

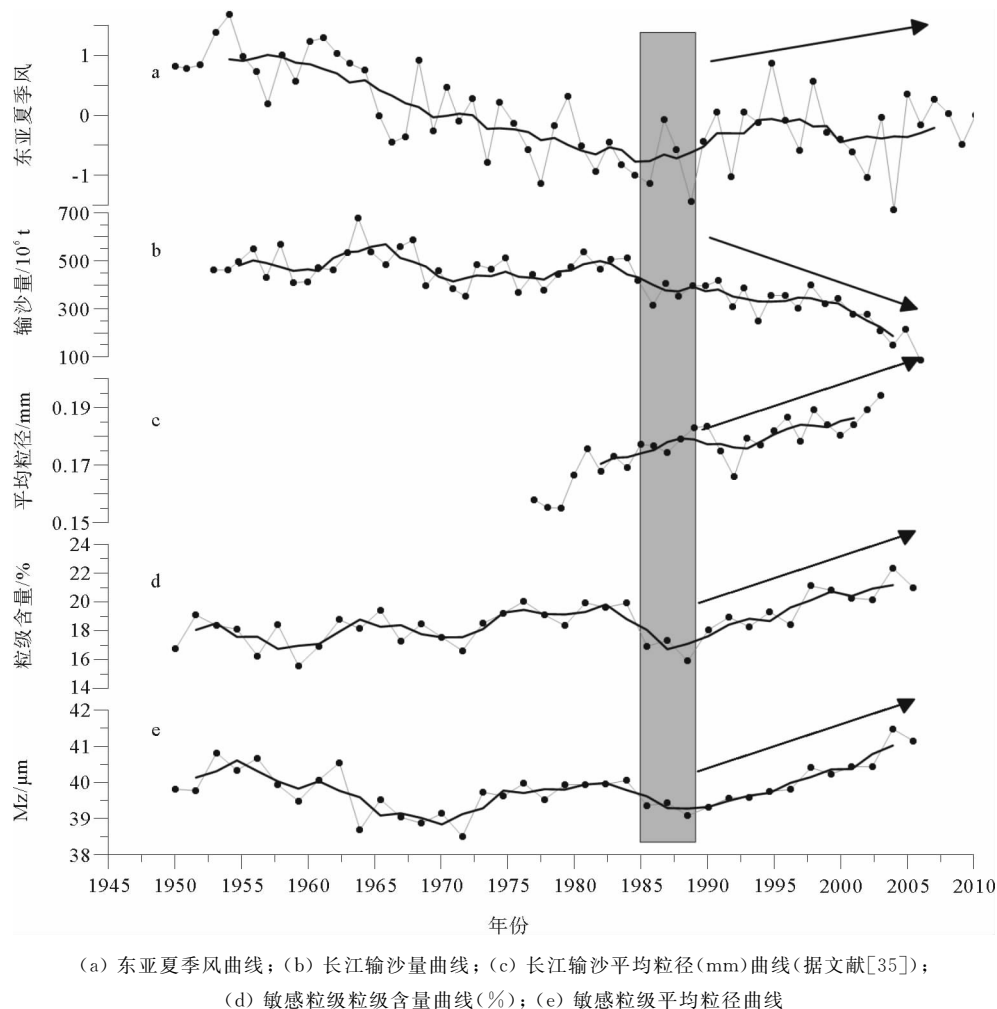


图 8 敏感粒级平均粒径和含量变化与长江输沙对比

Fig. 8 Comparison between the average grain size and content of sensitive grain size and the sediment transport of the Yangtze River

1985 年长江干流建立特大水库—葛洲坝水库,水库的建立对于泥沙的运移具有一定的调蓄作用。何坚^[35]通过实测资料指出,在平均净流量稳定的情况下,通过大通站的水流含砂量连年下降,然而砂体的粒径却有粗化的现象。研究表明,在相同水动力下,水体中含沙量的减小导致河流侵蚀河床加剧,导致粒径变粗^[35,36]。长江是南黄海泥质区重要的物源之一,其输沙量及输沙粒径的变化势必会影响南黄海泥质区沉积物粒度的变

化。同时基于南黄海的黏土矿物、稀土元素和地球化学资料,许多学者指出大量的长江物质被输运到南黄海泥质区^[37-39]。长江物质在长江冲淡水的作用下向东北搬运^[3],同时在黄海暖流的携带下输送至南黄海泥质区。Bian 等^[10]通过数值模拟也表明,长江物质可以输运至南黄海地区。Lan 等^[39]对南黄海表层沉积物样品稀土元素分析表明,中部细粒沉积物主要与黄河及长江物质的东南、东北扩散有关。分析认为,1985 年后沉

积物粒度变粗可能主要由物源的变粗引起。

根据观测资料,1986 年开始,东亚冬季风持续减弱,对应的强风天数逐渐减少,冬季风的减弱有利于长江物质汇入外海,进而随黄海暖流北上进入南黄海泥质区。同时,自 1986 年开始东亚夏季风持续增强。在冬季风持续减弱的情况下,南黄海泥质区很可能主要受到东亚夏季风的控制。在沉积物源持续变粗以及冬季风持续减弱以及夏季风增强的共同主导下,南黄海泥质区敏感粒级逐渐变粗。

3.3 敏感粒级对 1986/1987 年东亚季风从强到弱的记录

1986/1987 年被认为是东亚冬季风由强变弱的转折点,这已经得到了国内外学者专家的一致认同^[41,42]。同时,该观点在对西伯利亚高压、北极涛动的观测研究中得到验证^[43]。Wang 等^[44]将 2 种硅藻生物 AG/CS(AG: *A. Granulata*, CS: *C. Stelligera*)比值与东亚冬季风、西伯利亚指数、北极涛动对比,得出 1986 年比值突然下降,指示了其对应的冬季风也减弱。从图 8 中可以看出,东亚冬季风指数^[21]、西伯利亚高压^[45]显出冬季风有强变弱的转折点。F306 孔敏感粒径的平均粒径在 1986/1987 年由粗变细,为一突然减弱的转折点,指示了其对应的东亚冬季风由强变弱,说明敏感粒级很好地记录了冬季风强弱转换的拐点。

不同学者研究得到的东亚冬季风指数均显示,20 世纪 80 年代中期以来,东亚冬季风表现出明显的年代际减弱特征,这一特征与中国气候变暖趋势是非常吻合的^[21,46,47-50]。中国冬季气温在 20 世纪 80 年代中期发生了明显跃变,以 1986/1987 年为界,可以将中国冬季气温划分为冷、暖 2 个时期^[51,52],中国气温由负相位转化为正相位。敏感粒级记录的 1986/1987 年东亚冬季风由强变弱的转折点与气候变化也能够很好地对应,进一步说明了敏感粒级记录环境变化的可行性。

4 结论

(1)通过敏感粒级与东亚冬季风对比,得出二者具有很好地相关性。23.10~65.30 μm 的敏感粒级能够很好地反映强劲的冬季风 1950—1986 年的变化,并且很好地指示了东亚冬季风存在的

10 a 左右的周期性,可以作为东亚冬季风的强弱变化的替代性指标。

(2)1986 年后,南黄海泥质区粒度变粗可能受到长江葛洲坝水库建设的影响,说明了人类活动对沉积记录具有一定的影响;同时,冬季风的减弱以及夏季风的增强可能也是导致 1985 年后敏感粒级变粗的重要因素。

(3)敏感粒级记录了 1986/1987 年东亚冬季风由强变弱的转折点即 1986/1987 环境变化的拐点。首次发现了 1986/1987 年东亚冬季风逆转在海洋沉积物中的良好沉积记录。

参考文献:

- [1] Yang S Y, Jung H S, Lim D I, et al. A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea [J]. *Earth Science Reviews*, 2003, 63(1): 93-120.
- [2] Wang Y, Li G, Zhang W, et al. Sedimentary environment and formation mechanism of the mud deposit in the central South Yellow Sea during the past 40kyr[J]. *Marine Geology*, 2014, 347: 123-135.
- [3] Qin Y, Li F, Sinica A. Suspended matter in the South Yellow Sea[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 1989, 20(2): 101-112.
- [4] Lee H J, Chough S K. Sediment distribution, dispersal and budget in the Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 1989, 87(2): 195-205.
- [5] Milliman J D, Qin Y S, Park Y A. Sediments and sedimentary processes in the Yellow and East China Seas[C]// *Sedimentary Facies in the Active Plate Margin*. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company, 1989: 233-249.
- [6] Jung H S, Lim D, Choi J Y, et al. Rare earth element compositions of core sediments from the shelf of the South Sea, Korea; their controls and origins [J]. *Continental Shelf Research*, 2012, 48: 75-86.
- [7] Ichikawa H, Beardsley R C. The current system in the Yellow and East China Seas[J]. *Journal of Oceanography*, 2002, 58(1): 77-92.
- [8] Shi X, Chen C, Liu Y, et al. Trend analysis of sediment grain size and sedimentary process in the central South Yellow Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(14): 1202-1207.
- [9] Naimie C E, Blain C A, Lynch D R. Seasonal mean circulation in the Yellow Sea—a model-generated climatology[J]. *Continental Shelf Research*, 2001, 21(6): 667-695.
- [10] Bian C, Jiang W, Greatbatch R J. An exploratory model study of sediment transport sources and deposits in the Bohai Sea, Yellow Sea, and East China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(11): 5908-5923.
- [11] 王利波, 杨作升, 张荣平, 等. 南黄海中部泥质区 ZY2 孔

- 6200 年以来的海表温度记录及黄海暖流变化的影响[J]. 科学通报, 2011, 56(15): 1213-1220.
- [12] Hoshika A, Tanimoto T, Mishima Y, et al. Variation of turbidity and particle transport in the bottom layer of the East China Sea[J]. Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2003, 50(2): 443-455.
- [13] Gao S, Park Y A, Zhao Y Y, et al. Transport and resuspension of fine-grained sediments over the southeastern Yellow Sea[C]//Proceedings of the Korean-China international seminar on Holocene and late Pleistocene environments in the Yellow Sea Basin. Seoul National University Seoul, Korea, 1996: 83-98.
- [14] Liu J, Zhu R, Li G X. Rock magnetic properties of the fine-grained sediment on the outer shelf of the East China Sea: implication for provenance[J]. Marine Geology, 2003, 193(3): 195-206.
- [15] Hu L M, Shi X F, Guo Z G, et al. Sources, dispersal and preservation of sedimentary organic matter in the Yellow Sea: the importance of depositional hydrodynamic forcing[J]. Marine Geology, 2013, 335: 52-63.
- [16] Xiao S, Li A, Liu J P, et al. Coherence between solar activity and the East Asian winter monsoon variability in the past 8000 years from Yangtze River-derived mud in the East China Sea[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2006, 237(s 2-4): 293-304.
- [17] 王顺华, 肖尚斌, 周宜红, 等. 近 8 ka 东亚冬季风记录在东海内陆架的建立[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2007, 29(4): 348-352.
- [18] 向荣, 杨作升, 郭志刚, 等. 济州岛西南泥质区近 2300a 来环境敏感粒度组分记录的东亚冬季风变化[J]. 中国科学: D 辑, 2006, 36(7): 654-662.
- [19] Zhou X, Yang W, Xiang R, 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.
- [20] Wu B, Wang J. Winter Arctic oscillation, Siberian high and East Asian winter monsoon[J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(19): 3-13-4.
- [21] 贺圣平, 王会军. 东亚冬季风综合指数及其表达的东亚冬季风年际变化特征[J]. 大气科学, 2012, 36(3): 523-538.
- [22] Huang J, Li A C, Wan S M. Sensitive grain-size records of Holocene East Asian summer monsoon in sediments of northern South China Sea slope[J]. Quaternary Research, 2011, 75(3): 734-744.
- [23] Sun Y B, Gao S, Li J. Preliminary analysis of grain-size populations with environmentally sensitive terrigenous components in marginal sea setting[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(2): 184-187.
- [24] Gröger M, Henrich R, Bickert T. Glacial-interglacial variability in lower North Atlantic deep water: inference from silt grain-size analysis and carbonate preservation in the western equatorial Atlantic[J]. Marine Geology, 2003, 201(4): 321-332.
- [25] Rea D K, Hovan S A. Grain size distribution and depositional processes of the mineral component of abyssal sediments: lessons from the North Pacific[J]. Paleoceanography, 1995, 10(2): 251-258.
- [26] Prins M A, Postma G, Weltje G J. Controls on terrigenous sediment supply to the Arabian Sea during the late Quaternary: the Makran continental slope[J]. Marine Geology, 2000, 169(3): 351-371.
- [27] Boulay S, Colin C, Trentesaux A, et al. Mineralogy and sedimentology of Pleistocene sediment in the South China Sea (ODP Site 1144)[C]//Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. 2003, 184(211): 1-21.
- [28] Yuan D, Zhu J, Li C, et al. Cross-shelf circulation in the Yellow and East China Seas indicated by MODIS satellite observations[J]. Journal of Marine Systems, 2008, 70(1): 134-149.
- [29] Shi X, Liu Y, Chen Z, et al. Origin, transport processes and distribution pattern of modern sediments in the Yellow Sea[J]. Sediments, morphology and sedimentary processes on continental shelves. IAS Spec Publ, 2012, 44: 321-350.
- [30] 刘芳, 黄海军, 郜昂. 春、秋季黄东海海域悬浮体平面分布特征及海流对其分布的影响[J]. 海洋科学, 2006, 30(1): 68-72.
- [31] 董爱国. 黄、东海海域沉积物的源汇效应及其环境意义[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [32] 裴顺强, 李崇银. 东亚冬季风及其影响的进一步研究 I. 东亚冬季风变化及异常的特征[J]. 气候与环境研究, 2007, 12(2): 124-136.
- [33] An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan plateau since Late Miocene times[J]. Nature, 2001, 411(6833): 62-66.
- [34] Wu B, Wang J. Winter Arctic oscillation, Siberian high and East Asian winter monsoon[J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(19): 31-34.
- [35] 何坚, 潘少明, 沙红良, 等. 长江大通站床沙粒径变化及其对流域工程建设的响应分析[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2010, 46(3): 349-357.
- [36] 陈西庆, 严以新, 童朝锋, 等. 长江输入河口段床沙粒径的变化及机制研究[J]. 自然科学进展, 2007, 17(2): 233-239.
- [37] Cai D L, Shi X F, Zhou W J, et al. Sources and transportation of suspended matter and sediment in the southern Yellow Sea: Evidence from stable carbon isotopes[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(1): 21-29.
- [38] Lan X H, Wang H, Rihui L I, et al. Major Elements Composition and Provenance Analysis in the Sediments of the South Yellow Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(4): 197-203.
- [39] Lan X H, Zhang X J, Zhao G T, et al. Distributions of rare earth elements in sediments from Core NT1 of the South Yellow Sea and their provenance discrimination[J].

- Geochimica, 2009, 38(2): 123-132.
- [40] Hu B Q, Yang Z S, Zhao M X, 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.
- [41] Chen S, Chen W, Wei K. Recent trends in winter temperature extremes in eastern China and their relationship with the Arctic Oscillation and ENSO[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2013, 30: 1712-1724.
- [42] Wang L, Chen W. The East Asian winter monsoon: Re-amplification in the mid-2000s[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(4): 430-436.
- [43] 丁一汇, 柳艳菊, 梁苏洁, 等. 东亚冬季风的年代际变化及其与全球气候变化的可能联系[J]. 气象学报, 2014, 72(5): 835-852.
- [44] Wang L, Li J, Lu H, et al. The East Asian winter monsoon over the last 15,000 years: its links to high-latitudes and tropical climate systems and complex correlation to the summer monsoon[J]. Quaternary Science Reviews, 2012, 32: 131-142.
- [45] Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. East Asian winter monsoon and Arctic oscillation[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(10): 2073-2076.
- [46] 施 能. 近 40 年东亚冬季风强度的多时间尺度变化特征及其与气候的关系[J]. 应用气象学报, 1996(2): 175-182.
- [47] 徐建军, 朱乾根, 周铁汉. 近百年东亚冬季风的突变性和周期性[J]. 应用气象学报, 1999, 10(1): 1-8.
- [48] Wu B, Wang J. Winter Arctic oscillation, Siberian high and East Asian winter monsoon[J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(19): 31-34.
- [49] 施晓晖, 徐祥德, 谢立安. 近 40 年来东亚冬季风的年代际时空变化趋势[J]. 大气科学, 2007, 31(04): 747-756.
- [50] Wang B, Wu Z, Chang C P, et al. Another look at interannual-to-interdecadal variations of the East Asian winter monsoon: The northern and southern temperature modes [J]. Journal of Climate, 2010, 23(6): 1495-1512.
- [51] 宋 燕, 季劲钧. 气候变暖的显著性检验以及温度场和降水场的时空分布特征[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(2): 157-165.
- [52] 刘莉红, 郑祖光. 近百余年我国气温变化的突变点分析[J]. 大气科学学报, 2003, 26(3): 378-383.

RESPONSE OF SENSITIVE GRAIN-SIZE TO EAST ASIAN WINTER MONSOON FOR PAST 60 YEARS IN THE MUD AREA OF WESTERN SOUTH YELLOW SEA

GAO Xinghua^{1,2}, LI Guangxue^{1,2}, ZhANG Haiqi^{1,3}, Dada Olusegun A^{1,4}, LIU Shidong^{1,2}, CHEN Zhongya^{1,2}, LI Hengjian^{1,2}, WANG Linmiao⁵, LIU Ling²

(1 Key Lab of Submarine Sciences & Prospecting Techniques, MOE, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

3 Development Research Center, CGS, Beijing 100037, China;

4 Department of Marine Science and Technology, Federal University of Technology, Akure 340252, Nigeria;

5 Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: The study of the Core F306 has made it possible to acquire a resolution up to 1.5 years for the muddy deposits of the South Yellow Sea (SYS). The sensitive grain size population of the core is 23.10-65.30 μm (5.44 Φ -3.94 Φ), with a mean grain size of 38.5-41.4 μm (4.70 Φ -4.59 Φ) and the content ranges from 15.6 to 22.3 percent. The results illustrate that the sensitive grain-size fraction can be used as a sedimentary proxy to reconstruct the evolution of the East Asian Winter Monsoon (EAWM) at a higher resolution. Based on the changes in sensitive grain-size, the evolution of EAWM is divided into three stages (strong-weak-strong) during 1950—1986, revealing a cyclic change every 10 years. 1986/1987 is the turning point of EAWM from strong to weak in the recent 60 years, and this is a well responding to the East Asian climate change. From 1986 to 2007, the sensitive grain-size is mainly influenced by median grain size of the Yangtze River sediments, reflecting human impacts on the sediment records. The enhancement of East Asian Summer Monsoon and weakening of East Asian Winter Monsoon have also made contributions to the grain size coarsening.

Key words: sensitive grain-size fraction; East Asian Monsoon; South Yellow Sea mud area; high resolution; Yangtze riverbed sediments