

我国近海陆架锋面与生态效应研究回顾

刘东艳^{1,2}, 吕 婷¹, 林 磊³, 韦钦胜⁴

(1. 华东师范大学 河口海岸国家重点实验室, 上海 200241;

2. 华东师范大学 崇明生态研究院, 上海 200241;

3. 山东科技大学 海洋科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

4. 自然资源部 第一海洋研究所海洋生态环境科学与技术重点实验室, 山东 青岛 266061)

摘 要: 海洋锋面存在于特征明显不同的 2 种或多种水系或水团交界处, 锋面区域形成的次生环流和辐聚作用可显著影响到海洋中的物质输运与生物生产, 故受到海洋学家的广泛关注。研究发现, 我国近海陆架存在 14 个永久性的准静止锋面(渤海海峡锋面、山东半岛沿岸锋面、苏北沿岸锋面、西韩湾锋面、京畿湾锋面、济州岛西锋面、长江环形浅滩锋面、闽浙沿岸锋面、黑潮锋面、台湾沿岸锋面、闽粤沿岸锋面、珠江口沿岸锋面、琼东锋面和北部湾锋面), 且部分海域观测到双锋面、穿刺锋面和锋面波等现象。它们与陆架环流及其他动力过程(如: 涡旋、内波等)共同控制着我国边缘海的物质能量输运与交换以及生物生产力格局。近岸物质沿锋面、跨锋面输运与锋区的垂向输送过程对我国边缘海生物地球化学循环和生态过程存在显著季节性影响。冬季到春季, 沿岸锋面松弛能够加强物质从近岸向陆架的输运, 进而在空间上调制春季藻华暴发的时间与量级; 夏季到秋季, 我国边缘海存在显著的潮汐锋面系统, 锋面的辐聚效应以及次级环流可显著提高锋面区域的营养盐浓度和改善光照水平, 对浮游植物的生长聚集起到促进作用, 故在富营养化的河口与沿岸海域, 锋面区域容易成为赤潮或缺氧高发区。此外, 锋面的物理屏障作用使得两侧水团保持相对独立的物理与化学特征, 因而在我国边缘海生境区划和生物多样性梯度变化等方面扮演重要角色, 这些研究对认识我国边缘海物质循环与生物生产的控制机制具有重要作用。未来仍需充分结合观测与卫星资料, 运用多过程耦合的高分辨率模型, 深入认识锋面的精细结构与动态变化, 加强亚中尺度和小尺度过程及其生态效应的研究。

关键词: 河口锋面; 潮汐锋; 陆架坡折锋; 浮游植物; 生源要素; 生境区划

中图分类号: P731.2; X143

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2022)04-0725-17

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20220719001

引用格式: 刘东艳, 吕婷, 林磊, 等. 我国近海陆架锋面与生态效应研究回顾[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(4): 725-741.

LIU D Y, LÜ T, LIN L, et al. Review of fronts and its ecological effects in the shelf sea of China[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(4): 725-741.

锋面(Front)的概念起源于气象领域, 指冷暖气团相遇的交接面。日本海洋学家最早注意到海洋中冷暖流之间的分界条带, 称之为“潮目”并描述了其相关特征, 例如: 激流的出现、漂浮物的聚集、鱼类和鸟类的显著增加等^[1]。1950 年, 美国海洋学家在墨西哥湾流对“潮目”现象展开观测, 发现“潮目”位置存在波动弯曲、不断变化的动态特征^[2-3], 意识到该现象与气象锋面在原理和结构上存在相似性, 决定将其描述为海洋锋面(Ocean front)。1956 年, 美国学者首次给出海洋锋面的定义, 即海表密度急剧变化的带状区^[4]。20 世纪六七十年代, 有学者将锋面定义为纯粹的热现象, 认为将冷暖水体分开的条带即为海洋锋面^[5-6]。在综合前人研究的基础上, Fedorov 于 1986 年提出锋面区域与锋面的不同定义, 锋面区域是指主要热动力特征空间梯度相对较高的海域; 而锋面则是锋面区域内一个或多个特征参数(温度、盐度、密度、速度等)的最

收稿日期: 2022-07-19

资助项目: 国家自然科学基金重点项目——我国陆架海硅藻稳态转换特征及环境驱动机制研究(42030402); 国家自然科学基金面上项目——厚壁硅藻具槽帕拉藻在黄海增殖成因及对生物硅循环的影响(41876127); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目——人类活动和自然变化影响下的长江口缺/脱氧过程(GY0220S3)

作者简介: 刘东艳(1973—), 女, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事海洋生态学方面研究. E-mail: dyliu@sklec.ecnu.edu.cn

(王 燕 编辑)

大不连续面^[7-8]。因此, 锋面的位置可基于温度、盐度、密度、悬浮物、叶绿素等特征参数的水平梯度, 或它们的更高阶微商来判定。

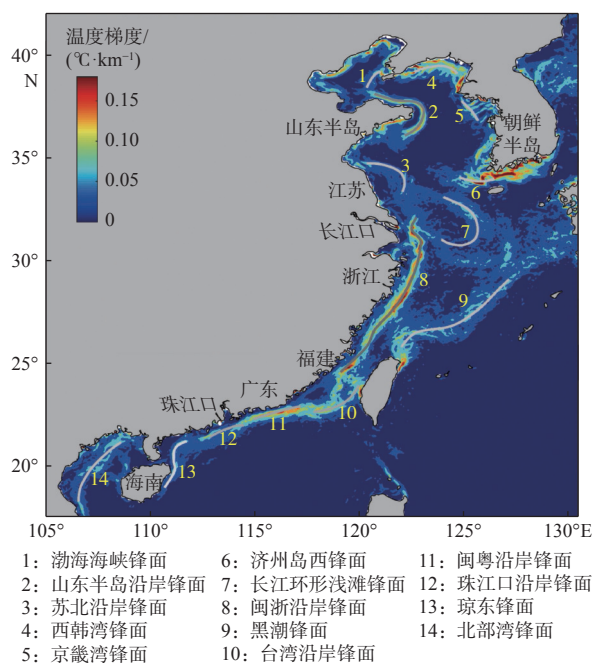
大量研究证据表明, 锋面广泛存在于河口、陆架、极地与大洋中, 是海洋中常见的物理过程, 水平尺度从米到千米不等, 受两侧水团变化与海气相互作用等因素的影响, 在空间和时间上呈现出不连续的高动态变化特征^[9]。海洋生命有机体的运动、聚集等行为十分依赖于海水中重力与光的变化方向, 锋面区域较强的垂直环流和辐聚等物理过程, 为实现上述行为提供重要机械能^[10-11]。例如, 大部分锋面的两侧或至少一侧存在表层辐聚作用, 以及与其相关的下降流, 能够抵抗下降流的物质或有机体会在上层水体聚集, 故与锋面相关的强辐聚流速可以非常有效地聚集浮游生物和其他漂浮物质(如: 灰尘、泡沫和木材等碎屑)^[12]。如果锋面区域存在辐散, 将会出现上升流, 可以把营养丰富的海洋次表层或底层水带入上层, 这些物理过程可为生物提供更多的营养物质与良好的光照条件, 是锋面区域形成高生产力的主要机制^[13-15]。

锋面区域的高生产力吸引了大量海洋生物前来觅食, 甚至在附近建立育幼场^[16-17]。金枪鱼、剑鱼或抹香鲸等自由游泳者, 可以通过复杂的感觉系统探测到锋面区域, 进而聚集到锋区漂浮物附近捕食有机体^[18]。沿海鸟类可以通过视觉发现猎物聚集区, 直接定位猎物或通过识别其他水下捕食者的数量与活跃程度来发现猎物; 远洋海鸟(如: 大型信天翁和海燕)甚至在飞行旅途中都可以利用嗅觉线索, 探测到聚集在锋面区域的浮游动物、鱼类或乌贼等, 从而获取补充能量的食物^[19]。此外, 锋面受两侧水体“力”的大小和内部流动状态影响, 其位置处于动态变化之中, 水体的不稳定性可以引起两侧水团的跨锋面交换, 形成一个过渡区。这个过渡区的生态梯度在一定程度上能够维持并加强不同水团间生态系统的相对隔离^[20-21]。因此, 狭窄的锋面区域在海洋物质运输、生物生产、群落与生境区划等方面扮演着重要角色, 深入理解锋面生态效应的形成与控制机制是生态系统预报预测的重要环节。

1 我国边缘海锋面的基本特征

我国边缘海一方面受到黑潮及分支水系季节性入侵的影响, 另一方面受到长江、黄河等大河流输入的影响, 这些不同性质的多个水系或者水团在陆架区域交互作用, 并受到陆坡地形约束, 沿等深线形成复杂的锋面结构^[22-23]。海洋学家通过现场观测、卫星遥感和数值模拟等研究方法, 历经数十年, 基本阐明了渤、黄、东、南海陆架锋面的位置、季节特征与机制类型, 明确了其中 14 个永久性的准静止锋面(图 1), 包括渤海海峡锋面、山东半岛沿岸锋面、苏北沿岸锋面、西韩湾锋面、京畿湾锋面、济州岛西锋面、长江环形浅滩锋面、闽浙沿岸锋面、黑潮锋面、台湾沿岸锋面、闽粤沿岸锋面、珠江口沿岸锋面、琼东锋面、北部湾锋面。它们与陆架基本环流及其他中小尺度海洋过程(如: 涡旋、内波等)共同调控着我国边缘海物质能量的运输以及生物生产过程。

我国边缘海锋面的早期研究始于河口^[30], 后逐渐拓展到陆架海。Zheng 和 Klemas^[31]率先利用卫星遥感红外影像, 明确了位于黄海沿岸流与黄海暖流交界处的山东半岛冬季锋面。继而, 赵保仁等^[24-26]



注: 东中国海 9 个永久性的准静止锋面与南海 5 个永久性的准静止锋面位置来源于文献^[24-29]。

图 1 我国边缘海 14 个准静止锋面的分布位置

Fig. 1 The position of quasi-stationary fronts in the marginal seas of China

发现了苏北沿岸锋面、西韩湾锋面、京畿湾锋面、济州岛西锋面, 以及渤海海峡锋面。随着水色卫星与微波遥感的发展, 海洋学家利用海表温度数据反演出了东中国海 9 个永久性的准静止锋面与南海 5 个永久性的准静止锋面(图 1 和表 1), 以及它们冬强夏弱的季节性变化特征^[23,27-28]。值得注意的是, 尽管在海表温度的探测上这些锋面呈现出冬强夏弱的特征(图 2), 但在观测以及高分辨率数值模拟的结果中, 夏季锋面并不弱, 强锋面常存在于海洋的次表层和底层(例如: Ma 等^[32]、Lü等^[33]、Wu 和 Wu^[34])。

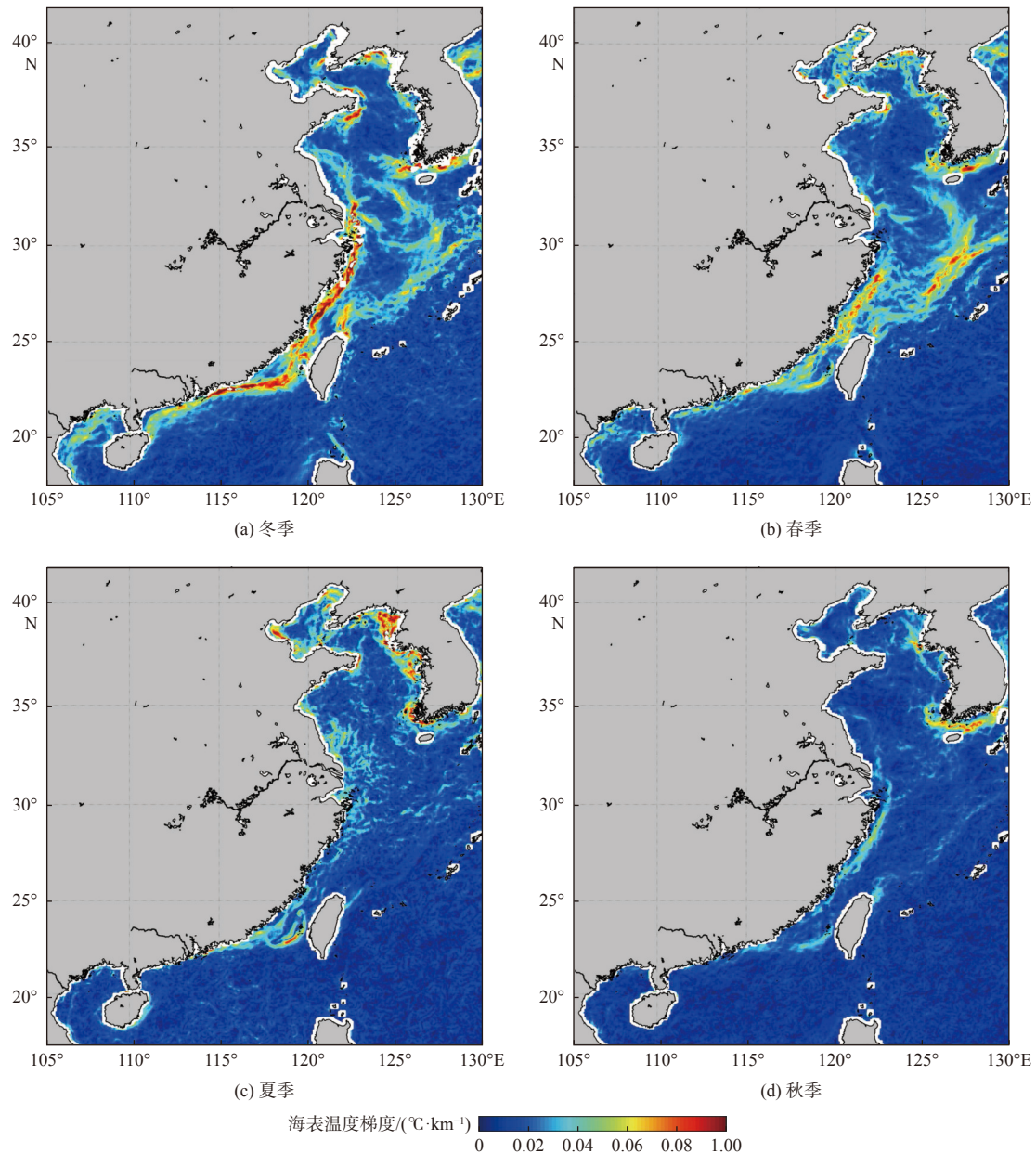
表 1 渤、黄、东海与南海北部主要锋面的名称与类型

Table 1 Types of main fronts in Bohai, Yellow Sea, East China Sea and northern South China Sea

海 域	锋面名称	锋面类型	参考文献
渤海	渤海海峡锋面 (Bohai Strait Front)	潮汐锋	赵保仁等 ^[26]
黄海	山东半岛锋面 (Shandong Peninsula Coastal Front)	潮汐锋(夏)/陆架坡折锋(冬)	Zheng & Klemas ^[31] 、Hickox 等 ^[28]
黄海	苏北沿岸锋面 (Jiangsu Coastal Front)	潮汐锋(夏)/陆架坡折锋(冬)	赵保仁等 ^[24-25] 、Hickox 等 ^[28]
黄海	西韩湾锋面 (Seohan Bay Front)	潮汐锋(夏)/陆架坡折锋(冬)	赵保仁等 ^[24-25] 、Hickox 等 ^[28]
黄海	京畿湾锋面 (Kyunggi Bay Front)	潮汐锋(夏)/陆架坡折锋(冬)	赵保仁等 ^[24-25] 、Hickox 等 ^[28]
黄海	济州岛西锋面 (Western Chejudo Front)	潮汐锋(夏)/陆架坡折锋(冬)	赵保仁等 ^[24-25] 、Hickox 等 ^[28]
东海	长江浅滩环形锋面 (Yangtze Bank Ring Front)	陆架坡折锋	Hickox 等 ^[28]
东海	闽浙锋面 (Min-Zhe Coastal Front)	潮汐锋(夏)/陆架坡折锋(冬)	Ning 等 ^[27] 、Hickox 等 ^[28]
东海	黑潮锋面 (Kuroshio Front)	西边界流锋面/陆架坡折锋	Ning 等 ^[27] 、Hickox 等 ^[28]
南海	台湾沿岸锋面 (Taiwan Bank Front)	陆架坡折锋/上升流锋	Wang 等 ^[29] 、肖晖等 ^[35] 、李立等 ^[36]
南海	闽粤沿岸锋面 (Min-Yue Coastal Front)	陆架坡折锋	Wang 等 ^[29] 、肖晖等 ^[35] 、李立等 ^[36]
南海	珠江口沿岸锋面 (Estuarine Front of Pear River)	羽流锋	Wang 等 ^[29]
南海	琼东锋面 (Coastal Front of Eastern Hainan Island)	潮汐锋	Wang 等 ^[29] 、Hu 等 ^[37]
南海	北部湾沿岸锋面 (Coastal Front of Beibu Gulf)	潮汐锋(夏)/陆架坡折锋(冬)	Wang 等 ^[29]

学者们进一步对锋面的形成机制开展了大量研究。Huang 等^[23]认为冬季锋面的形成机制主要有 2 个: 一是近岸和中部陆架不同水深的水温对海表降温的响应不同, 故形成了沿水深变化的温度梯度; 二是暖流和冷的沿岸流交汇增强了温度梯度。夏季锋面的形成则主要由潮汐混合所致, 存在天气尺度和大小潮变化, 以及与上升流的联合作用^[23,26,38]。根据 Ou^[39]的研究, 陆架上密度梯度形成后, 地转调整等过程会促进局地辐聚, 强化初始密度梯度, 进而引起密度的水平不连续, 导致锋面的形成。刘先炳和苏纪兰^[40]曾指出夏季闽浙沿岸锋面的形成主要与上升流有关, 但这与潮汐锋面的阐述并不矛盾, 因为吕新刚等^[41]的数值研究表明, 该上升流的产生与潮汐混合有着密切的关系。锋面处往往伴随着上升流的产生, 并会提升表层锋面的强度。在东中国海的锋面中, 黑潮锋面与其他锋面的形成机制不同。黑潮锋面是由西边界流及东海大陆坡联合作用下形成的陆架坡折锋, 海气相互作用对该锋面的形成具有重要作用, 海表温度梯度形成的海表气压差诱导沿锋面的海表风, 增强了跨陆架环流, 导致较暖的陆架外水体向陆架汇聚, 增加了锋面强度^[42]。闽粤与台湾沿岸冬季锋面的形成是沿岸流和南海水交汇作用的结果, 而夏季锋面的形成主要与上升流有关^[35-36]。Pi 和 Hu^[43]利用卫星遥感海表温度数据研究了台湾海峡及其附近海域的锋面, 发现台湾浅滩锋可细分为南部浅滩锋和北部彰云沙脊锋, 2 条锋面在强盛时期会连在一起, 不易区分; 它们在 1 月至 5 月为锋面活跃期, 而在 6 月至 10 月为衰退期。海南岛东岸(琼东)和北部湾沿岸锋面形成的主要动力亦是潮汐混合, 但锋面位置和强度受气象状况影响显著, 东北季风加强有利于锋面强度的增加^[37,44]。此外, Yu 等^[45]通过分析 2003 年至 2017 年南海的海表温度, 发现锋面年际变化趋势受到厄尔尼诺过程的影响。这些研究明确了

潮致混合、上升流以及天气尺度对锋面位置、强度与结构的综合控制作用，对理解锋面的生态效应具有重要的理论支撑作用。



注：2010年至2019年4个季节平均的海表温度梯度参考Lin等^[46]计算方法；

数据来源于美国海洋和大气局的Pathfinder海表卫星遥感数据^[47]。

图2 我国边缘海锋面强度的季节变化特征

Fig. 2 Seasonal variations of the front intensity in the marginal seas of China

随着卫星分辨率的提高、观测强度的增加与高分辨模式的运用，一些双锋面结构在我国边缘海被识别出来。例如，利用4 km分辨率的MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)海表温度数据，He等^[48]发现冬季闽浙沿岸存在双锋面结构，其形成与近岸水深梯度及不同水深对冬季海表降温的响应差异密切相关。Lin等^[46]通过约1 km分辨率的MUR(Multi-scale Ultra-high Resolution)海表温度数据，发现北黄海沿岸在夏季存在一条沿10 m等深线的锋面，与潮汐锋面(基本沿40 m等深线)几乎平行，它们在空间上形成

一个双锋面结构,这与夏季斜坡地形导致的差温加热和潮汐混合密切相关。此外,锋面结构的不稳定性会诱导锋面穿刺和锋面波等亚中尺度、小尺度过程。根据卫星遥感叶绿素 a 质量浓度和海表温度数据,Yuan 等^[49]首次在闽浙沿岸发现跨陆架穿刺锋面。穿刺锋面的形成机制受到学者关注。Yuan 等^[50]认为穿刺锋面与台湾暖流和闽浙沿岸流的辐聚有关;Ren 等^[51]则认为是季风转换的作用;Wu^[52]利用数值模拟分析发现潮汐混合的不均匀性导致了等密线沿等深线方向的起伏,这种起伏进一步通过斜压与下垫面陆架地形的耦合作用产生了跨陆架的输运,因此提出“潮汐-背景密度层联合作用”机制。Yin 和 Huang^[53]通过分析水色遥感图像,进一步发现闽浙沿岸锋面上存在尺度为 10~20 km 的锋面波动,风暴激发的锋面斜压不稳定性导致亚中尺度涡的形成,引起跨锋面水体交换。无论是锋面还是锋面穿刺和锋面波引起的次生物理过程,都能够在局部空间上调控海洋中的物质分配,进而影响到生态系统中的初级生产者,并在食物链上形成级联效应。下文将具体分解我国学者对不同类型锋面的生态效应研究。

2 河口锋的生态效应

在河口或河口羽流的边缘,陆地淡水与高盐度海水交汇往往会形成河口锋。大型河口的河口锋结构明显,可以观察到显著的泡沫带辐聚和水体颜色变化,其位置和强度受到径流量与外部强迫场(如:风、潮汐等)的共同影响,如长江口、珠江口、密西西比河口^[54-55]。河口锋存在不同类型,如果河流携带大量泥沙,在营养物质丰富的内河口,会出现典型的泥沙锋面。泥沙锋面产生的物理机制属于潮汐混合锋的一种,由低盐冲淡水和潮汐混合相互作用形成。锋面靠岸的浅水侧,潮汐混合导致泥沙再悬浮,故水体呈现悬浮物浓度高、营养物质丰富但光线低的特征;而锋面向海的深水侧,水体的层化抑制了泥沙再悬浮,故水体相对清澈,同时泥沙锋附近迅速升高的盐度可加大絮凝作用,导致泥沙在锋面附近快速沉降,呈现肉眼可见的清浊分界线(图 3a)。进入外河口,盐度相对较低的河流冲淡水与陆架高盐水汇聚,相互作用会形成羽流锋(图 3a)。密度相对较低的冲淡水堆积在密度较高的海水上层,所产生的正压梯度力的方向与其下侧高密度水体形成的水平斜压梯度力方向相反,使得羽流锋区表现出水体辐聚特征,对河口物质输运以及生物生产发挥重要作用^[56-57]。

长江是世界上径流量最大的河流之一,每年向海洋输送大量的淡水、悬浮泥沙和各类营养物质。大量研究表明,长江口泥沙锋面对长江陆源物质向海输送具有重要影响。泥沙与悬浮颗粒物存在吸附行为,故泥沙沉降能够捕获与截留河流带来的污染物,使得各种形态的化学物质在泥沙锋面附近骤减,如:有害重金属,有机磷和持续性有机污染物等,发挥了河口的自然过滤作用^[58-60]。在外河口,长江冲淡水向外扩展并与陆架高盐水之间形成羽流锋面,在空间上与泥沙锋面一起形成一个类似“三明治”的结构,将水体“切割”成 3 个不同性质的水团(图 3b)。由于长江口悬浮物质在泥沙锋面附近大量沉降,浊度在向海的深水侧显著降低,水体光照条件得以快速提升,同时,羽流锋的南侧在地形诱导下会形成上升流,将底层营养盐带至表层水体,这些过程非常有利于上层水体浮游植物的生长,再结合锋面区域的物理辐聚作用,在泥沙锋和羽流锋之间容易形成一个浮游植物高值区(图 3b),甚至在春夏期间出现大面积赤潮^[61-62]。例如,2003 年 6 月在长江口海域出现以中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、异甲藻(*Heterocapsa circularisquama*)和具齿原甲藻(*Prorocentrum dentatum*)为主的大面积赤潮,对应的叶绿素 a 高值区靠近羽流锋区^[61]。类似现象在珠江口外亦有报道。1998 年 11 月,珠江口发生过一次大规模甲藻(*Gymnodinium cf. catenatum*)赤潮,现场实测和卫星数据发现,赤潮位置主要出现在较冷的低盐冲淡水与较暖的高盐南海水形成的锋面区域^[63]。锋面过程还会影响到河口缺氧区的形成与分布。已有的观测与模式结果显示,夏季长江口缺氧核心区主要发生在泥沙锋与羽流锋之间的海域,而且羽流锋在春-夏-秋之间的季节性转向会影响到缺氧区的位置变动^[64-66]。在夏季观测中,还发现长江口会间歇性地出现低盐斑块脱离冲淡水主体锋面的现象,进而形成离岸低盐水团^[67-70];具有较高营养盐与透明度的低盐水团,能够触发离岸浮游植物藻华,藻体大量死亡后的沉降分解过程会快速消耗氧气,成为底层水体缺氧的重要诱因^[69]。长江口亦同时存在上升流锋面与河口羽流锋的耦

合现象^[65,71]。上升流的垂向输运可有效补充锋区的营养盐^[72],甚至对海-气界面的 CO_2 通量产生影响^[73]。长江口-浙江近海的关联性研究发现,在夏季底层缺氧发生期间,上升流的存在可将缺氧水体抬升至上层,扩大缺氧区的空间体积,进而产生一系列的生物地球化学效应^[65,72]。

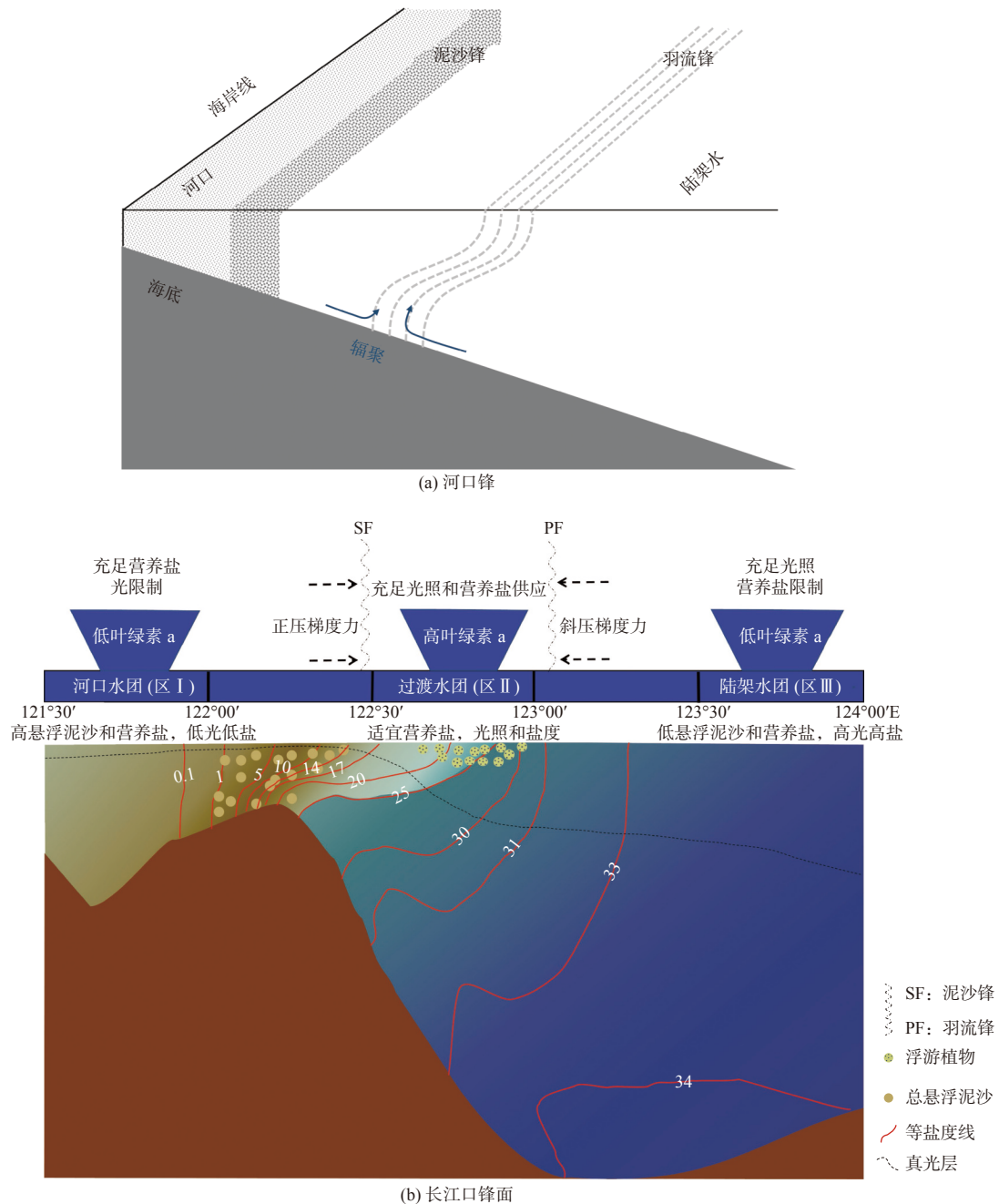


图 3 河口锋面结构示意图及长江河口泥沙锋与羽流锋的位置及环境特征

Fig. 3 Schematic diagram of estuarine fronts, locations of the sediment and plume fronts in the Changjiang River Estuary and their environmental characteristics

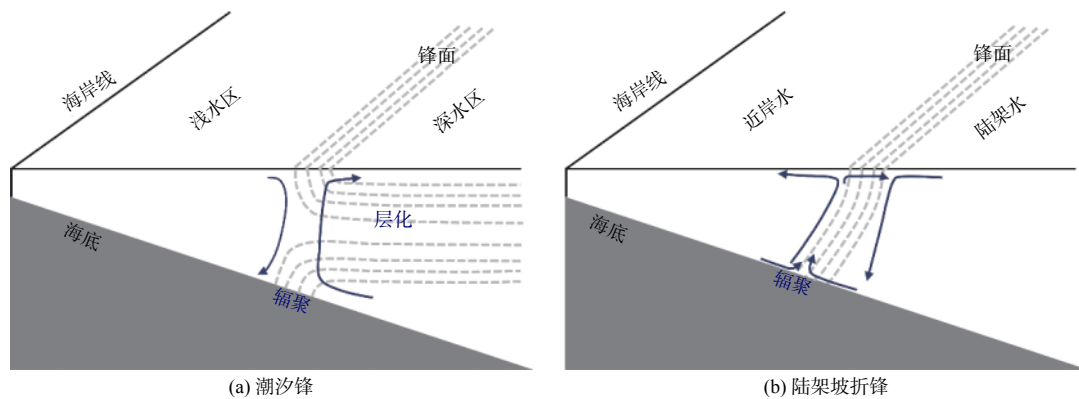
泥沙锋和羽流锋形成的双锋面结构会导致不同水团间生态系统的相对隔离,并通过维持生态梯度表达出群落结构的差异性。例如,调查结果表明,硅藻的优势度在长江口泥沙锋近岸一侧可达 93%;在泥沙锋

和羽流锋之间的区域,硅藻(~72%)和隐藻(~13%)贡献度相对较高;而在羽流锋离岸一侧,定鞭藻(~53%)和隐藻(~13%)的贡献度则更为显著^[74-75]。类似现象在珠江口亦有报道,研究者发现浮游植物粒级在锋面向陆一侧以小型和微型(细胞大小:3~200 μm)为主,而在锋面向海一侧则以微微型(细胞大小 $\leq 3 \mu\text{m}$)为主^[76-78]。传统研究认为生态梯度与河口盐度变化相关,而锋面的形成在原理上与河口盐度梯度密切相关,因此,如果我们能以锋面为边界来考虑生态梯度问题,会更为准确,因为它是温盐等多因素综合作用的结果。

河口锋面还会对陆源有机碳在海洋中的运输、移除和埋藏产生影响。长江口与东海陆架沉积速率的研究表明,长江口和东海内陆架泥质区的 ^{210}Pb 沉积速率通常在1~3 cm/a,而东海中/外陆架沉积速率明显降低($< 3 \text{ mm/a}$)^[79]。东海陆架有机碳的收支模型显示,超过95%的陆源有机碳在长江口和东海内陆架埋藏,而仅有不到5%会进入东海中/外部陆架^[80]。据估算,中国东部边缘海泥质区生源有机碳的年埋藏通量为 $(7.00 \pm 0.79) \text{ Mt}$,与中国主要河流流域内硅酸盐风化所吸收的 CO_2 通量相近 $(5.05 \sim 7.52 \text{ Mt/a})$ ^[81-82],这些研究结果表明与河口有密切关联的泥质沉积区是有机碳埋藏与保存的热点区域,可形成有效的碳汇。因此,需要深入探究河口锋面对物质运输的屏障作用,以及对内陆架碳埋藏的重要贡献。

3 潮汐锋与陆架坡折锋的生态效应

大多数沿岸锋面的形成都与潮致混合密切相关。沿岸区域的潮汐能量耗散较高且存在较强的湍流混合,故能够克服季节性水柱分层形成一个潮致强混合区,它与层化的离岸深水区之间会形成潮汐锋面(图4a)。受非线性潮汐的强烈影响,近岸水团的非对称潮汐混合和斜压涡存在不稳定性,有利于物质的跨锋面输运^[83-84]。例如,大潮增强的混合作用可迫使锋面向离岸方向移动,部分层化水体因此转变为混合状态,故近岸与深层水的营养物质会被输送到离岸的上层水体中,有效支持浮游植物生长^[55,85]。此外,风应力诱导的埃克曼(Ekman)输运会在短期内将水体和颗粒物质从层化区输运至混合区,为上层水体浮游植物的生长提供营养物质^[55,86]。我国山东半岛锋面、闽浙沿岸锋面等近岸锋面系统均有此特征。



注:图a和图b改绘自Mann和Lazier^[55];灰色虚线表示等密度线,箭头线表示次级环流。

图4 潮汐锋与陆架坡折锋的垂向结构示意图

Fig. 4 The vertical structure of tidal fronts and shelf-break fronts

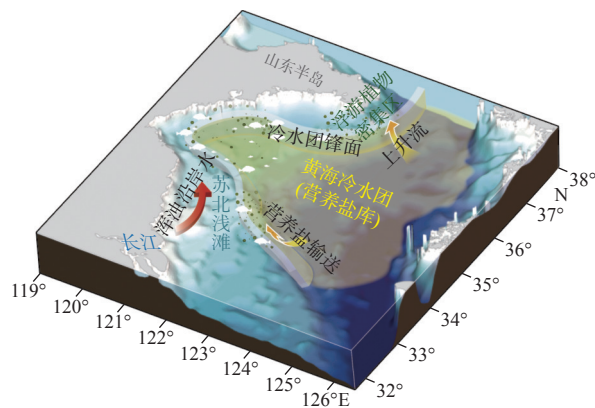
山东半岛和苏北浅滩外侧夏季锋面的形成与黄海冷水团密切相关。黄海冷水团是一个以低温为主要特征的巨大水团,存在于黄海中部的深水区,它与上混合层之间形成较强的温、盐跃层,受潮混合作用的影响,其周围会形成水平梯度很强的温盐锋面^[87]。冷水团中有机质分解后产生的营养盐会积聚在底部水体,形成一个巨大的营养物质贮库,而冷水团边界锋区的潮致上升流能够将底层营养物质输送到上层水体,助力上层水体的生物生产(图5)。已有研究表明,夏季由南黄海冷水团边界锋区上升流输送至真光层

中的溶解态无机氮、磷酸盐和硅酸盐通量可分别达 $1.44 \times 10^3 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $0.11 \times 10^3 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $2.01 \times 10^3 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ，约占总营养盐供应量的 30%~50%；在受冷水上涌影响的区域，营养盐通量与水柱积分叶绿素 a 和初级生产力之间均呈显著的正相关关系^[88]。此外，受海水富营养化过程的影响，我国大部分近岸海域存在氮磷比例失衡的问题。有研究表明黄海冷水团存在有效的脱氮作用^[89]，故冷水团边界锋区上升流可在一定程度上改善上层水体中营养盐结构失调的状态。夏季冷水团边界锋面还能够有效阻碍悬浮泥沙由近岸向远岸的输运，使得近岸高浊度水体与离岸海水之间存在清晰的边界(图 5)。这一现象在苏北浅滩外侧尤为显著，冷水团锋面海域浊度明显降低，为离岸浮游植物的繁殖提供了良好的光照条件^[90]，并伴随着高丰度的浮游纤毛虫^[91]。

冬季，受黄海暖流入侵影响，黄海冷水团逐渐消失，锋面逐渐演变为黄海暖流与沿岸水交汇而形成的温度梯度，同时，黄海沿岸流在北风驱动下沿锋面南下，从而对山东半岛海域的物质输运起到重要的作用。在水平方向上，锋面的“屏障效应”给近岸物质的跨锋面离岸水平输运带来难度，使得悬浮颗粒物主要集中在锋面的向岸一侧，例如，受锋面的屏障作用影响，山东半岛成山头附近海域的泥质沉积区在形态及空间位置上形成与“Ω”型锋面结构相对应的特征^[94-95]。Wang 等^[96]通过高分辨率的数值模拟也发现，锋面不仅影响山东半岛近岸海域悬浮物质的输运和沉积，而且还一定程度上控制着泥质区的发育。Lin 等^[46]利用卫星遥感和现场观测发现，江苏沿岸冬季锋面的叶绿素 a 高值条带与锋面对悬浮泥沙跨锋面输运的限制作用密切相关，悬浮泥沙浓度在锋面附近快速降低，导致锋面外侧的光照水平显著提升，促进了浮游植物的生长。Lü 等^[97]通过对 20 年的卫星遥感数据与观测数据的比较研究发现，山东半岛冬季锋面强度与结构变化能够影响混合层深度与湍流扩散速率，春季松弛的锋面有助于提高水体稳定度并促进混合层变浅，这些物理过程不仅能够帮助浮游植物在上层水体积聚，还会加速营养盐从近岸向陆架的输送，对离岸浮游植物春季水华的暴发时间和规模起到重要的调制作用。此外，锋面区域产生的潮致上升流对营养盐向上层水体的垂向输送具有重要影响。胡好国等^[98]利用三维物理-生物耦合模式发现，南黄海锋面区域叶绿素 a 质量浓度高值区的成因与锋区较强的垂直涡动扩散相关，海水底层的营养盐可以通过混合输送到表层。锋区上升流引起营养盐垂向输运并支撑着高生物量的浮游植物，这为黄海鲢鱼的产卵、育幼提供了充足的食物，在黄海大海洋生态系统的形成和维持过程中发挥着重要作用^[93,99-101]。

锋面的上述生态效应在闽浙沿岸、闽南-粤东、粤西-琼东、南海西南部均有观测报道^[102]。闽浙沿岸锋面与台湾东北部向东海陆架的涌升流，在支撑东海内陆架的生物生产方面发挥着重要作用^[103]，特别在舟山群岛以南海域^[104]。该区域的上升流主要来自黑潮次表层水，富含磷酸盐且营养盐结构合理(N/P 比值约为 14~15.4)，可以改善近岸海域磷酸盐限制与 N/P 比值过高的状态^[105-106]。然而，闽浙沿岸锋面上升流同时也会输送大量来自底泥的藻类孢囊，它们可以在光照、温度和营养盐合适的情况下萌发，并结合锋面的辐聚作用形成赤潮^[107-108]，对生态系统健康产生一定的负面效应。例如，Dai 等^[109]和曾宇兰等^[110]发现东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense*)赤潮暴发早期主要出现在闽浙沿岸锋面处，故认为锋面是原甲藻赤潮发生的种源地。此外，黑潮水中的一些甲藻也会随上升流到达闽浙锋面处，成为赤潮暴发的种源^[108]。这些研究对理解闽浙沿岸锋面直至长江口的大面积赤潮、缺氧等生态灾害现象具有重要参考价值。

在陆架坡折处，盐度较低且偏冷的陆架水与盐度较高且偏暖的大洋水相遇，会形成陆架坡折锋面



注：本图改绘自文献^[92-93]。

图 5 夏季黄海冷水团锋区的主要生态特征

Fig. 5 The primary ecological characteristics near the frontal zone of the Yellow Sea Cold Water Mass in summer

(图 4b), 该类锋面形成时会受到海气耦合和斜坡地形的共同作用, 故通常沿等深线分布^[111-112]。锋面对大气混合层的影响会削弱垂直切变并加强海表面风, 强风进而促进垂直混合, 将营养物质丰富的底层水携入上层透光区, 可显著提升海洋初级生产力, 有力支撑了海洋渔场的渔获量^[113-114]。此外, 沿锋面急流和跨锋面二次环流的存在可进一步加强底层营养盐向上层水体的输送能力, 为次表层浮游植物的生长提供有利条件^[42,115-116]。例如, 形成于新西兰南岛东南沿海的陆架坡折锋, 能够将常量营养盐缺乏但铁含量相对丰富的亚热带暖水与常量营养盐丰富但缺乏铁和硅酸盐的亚南极冷水混合起来, 显著提高该区域的初级生产力水平, 支撑深水鱼类资源^[117-118]。

黑潮锋面属于典型的陆架坡折锋, 由西边界流及东海大陆坡联合作用形成。20 世纪 80 年代, 我国“向阳红”09 号调查船对(128°30'E, 25°~33°N)以西海域进行了多学科综合性调查, 在黑潮西侧的上升流诱导锋面内, 发现叶绿素 a 质量浓度可增加到 0.3 mg/m³, 而黑潮其他水域的叶绿素 a 质量浓度则低于 0.2 mg/m³^[119]。最初认为近岸陆架锋和黑潮锋的屏障作用, 会留储营养物质自近岸区向外扩散的通量, 从而有助于浮游植物在黑潮锋靠陆架侧生长, 导致叶绿素 a 高值区的产生^[120-121]。Chen 等^[42]利用海洋-大气耦合模型研究了锋面海气相互作用和相关海洋环流对营养盐输送和初级生产的影响, 发现锋面上升流可以加强水体垂向混合作用, 从而促进富含营养盐的底层水向真光层的输送, 支撑浮游植物在该区域的生长。随后, 科学家认识到锋面过程的复杂性和不稳定性同时还会诱导涡旋和次级环流的产生, 对物质的跨锋面、跨跃层交换产生重要影响。黑潮北上过程中与东海陆架水的相互作用主要通过锋面涡旋进行。在黑潮锋面涡存在的情况下, 被泵吸到真光层并向陆架方向运输的 NO₃-N 量可达 1.7 × 10⁵ t/a, 这些营养盐可以通过上升流进入东海内陆架^[122]。类似现象, 在南海西南部锋面上升流区亦有报道, 发现上升流区存在活跃的细丝状和涡旋状次中尺度过程^[123-124], 其水平尺度约为 1~10 km, 可以提升锋面处的垂向流速, 是物质垂向交换的重要途径^[125]。

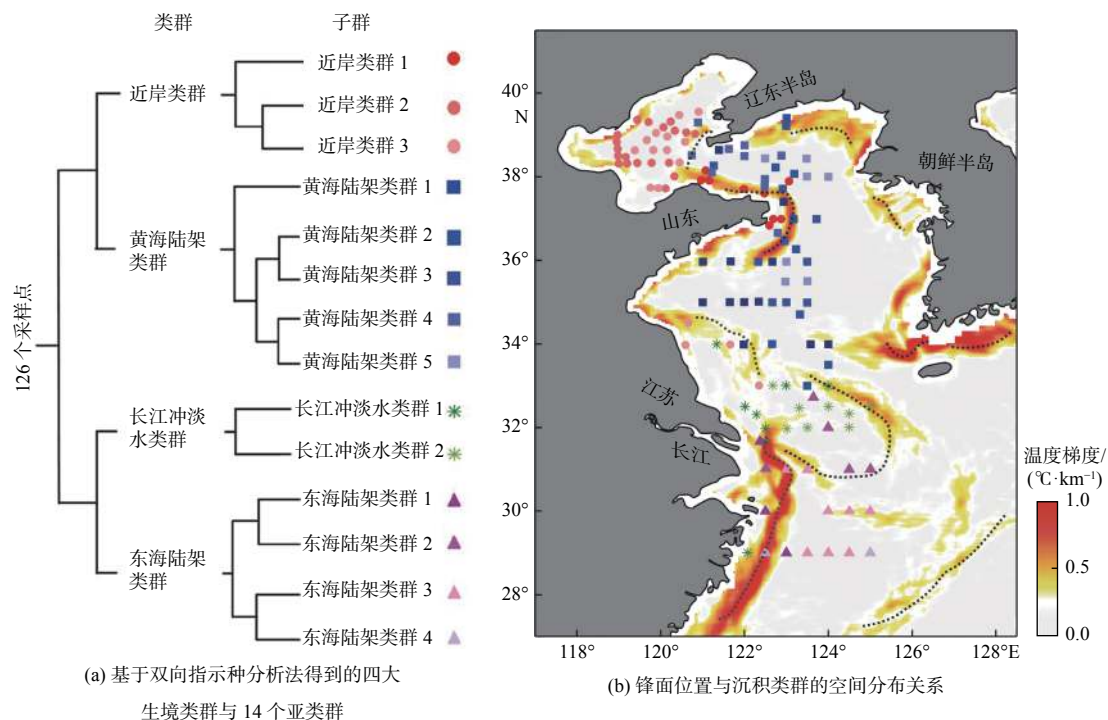
Yuan 等^[49]根据卫星遥感叶绿素 a 质量浓度和海表温度数据, 首次报道了夏、秋季东海闽浙沿岸的跨陆架穿刺锋面, 其尺度在百千米范围内。研究显示, 风场作用下长江冲淡水南下并堆积在闽浙沿岸是穿刺锋面产生的一个重要前提, 而风场和台湾暖流在穿刺锋面运移过程中发挥着重要作用^[126]。东海穿刺锋面无疑能够增强跨陆架方向的水体和物质运输。穿刺锋面可成为具有较高营养盐的内陆架水与低营养盐外海水交换的重要通道, 进而将内陆架营养盐向外海输出, 故穿刺锋面区往往伴随着叶绿素的高值^[52,126], 这也在一定程度上证实了穿刺锋对物质运输和生态过程的影响。Ren 等^[51]还报道了东海穿刺锋面对溶解态铝分布和运输的影响, 并由此发现该锋面在扩展过程中存在方向偏转现象。综上可以推断, 穿刺锋面与闽浙沿岸锋面一起形成复杂的锋面结构, 穿刺锋面作为驱动东海物质离岸运输的重要物理过程, 与黑潮次表层水向岸入侵和内陆架上升流的向岸运输相对应, 共同驱动了该区域生态系统的物质与能量交换过程。

4 锋面的生态区划功能

锋面的屏障作用除了影响物质的交换, 还可以限制两侧水团中不同生物群落的交换, 在锋面上则可以形成一个群落交错区, 使锋面两侧保持相对独立的生态系统^[7,127]。这个功能在浮游生态学研究尤显重要, 它能够帮助研究者在空间上更好地认识群落分布的规律和控制机制。除上文中提到长江口锋面对浮游植物组成存在梯度效应之外, 我国学者基于遥感、流式细胞技术和色素分析等方法, 在多个海域观测到浮游植物的物种多样性与粒度结构在锋面两侧存在显著差异。例如, 在黄海沿岸锋面, 研究者发现硅藻和甲藻在锋面近岸一侧的丰度更高, 而蓝藻、青绿藻、聚球菌和真核浮游生物在锋面离岸的黄海暖流一侧丰度更高^[128]。这种空间差异同样在浮游植物的粒级组成研究中得到证实。Fu 等^[129]的研究发现黄海中部主要以微型和微型浮游植物为主, 而近岸则以小型浮游植物为主。再如对南海北部陆架锋面的观测表明, 硅藻在以锋面为界的近岸水团(< 50 m)中, 全年均呈现出较高的优势度, 其次为甲藻、青绿藻和聚球藻; 而陆架

水团(50~200 m)中的浮游植物多样性相对较高,且具有显著的季节变化,夏季以硅藻为主,春季以原绿球藻和聚球藻为主,秋冬季则以定鞭藻和青绿藻为主^[130-131]。

有学者还发现锋面对有害藻华空间扩展范围有限制作用。例如,南黄海浒苔(*Ulva prolifera*)在漂移过程中会受到苏北沿岸锋面的限制,其分布的东边界与锋面上升流的位置大致重合,尤其在苏北近岸海域^[132]。Qi等^[133]通过分析20年的卫星产品,亦发现东海夜光藻(*Noctiluca scintillans*)赤潮的分布范围始终受到锋面结构的限制,其中,闽浙锋面和黑潮锋面成为夜光藻赤潮的两侧外边界,而赤潮北边界则与长江浅滩环状锋面的位置吻合。Liu等^[134]利用双向指示种分析法对东中国海沉积微化石类群(硅藻、甲藻和硅鞭藻)的空间分布开展了综合研究,并与东中国海的锋面结构进行了空间重合分析,发现锋面不仅是上层水体浮游植物群落的重要生境边界,亦是区划不同沉积微化石生境类群的重要生境边界(图6)。依据水团性质和锋面结构,将东中国海沉积硅、甲藻类群划分为近岸类群、黄海陆架类群、长江冲淡水类群和东海陆架类群四大类群以及14个亚类群,其中上升流对长江环状锋面的影响清晰可见(图6)。这些研究结果将海洋生物纬度变化梯度与锋面结构的变化联系起来,对于启发我们综合认识海洋生物的空间分布规律具有重要的科学意义。



注: 图a和图b来源于Liu等^[134]; 图b中虚线代表锋面位置。

图6 东中国海沉积硅藻、甲藻和硅鞭藻类群分布与锋面结构的时空关系

Fig. 6 The spatial relationship between fronts and microfossils (diatoms, dinoflagellates and silicoflagellates) in the Eastern China Seas

5 结 语

综上所述,历经数十年的研究积累,我国边缘海锋面的类型、结构、季节变化特征与机制逐渐清晰;对锋面以及锋面区域的生态效应取得了较好的认识,包括调控我国近海泥沙的输运格局、补充上层水体中的营养盐、提升浮游植物生物量、划分群落生境等方面。需要指出的是,本文主要针对尺度相对较大的锋面(几十至几百千米)研究进行了回顾与总结。我国边缘海锋面结构复杂,且受观测分辨率的限制,锋面涡、

锋面波以及穿刺锋面等亚中尺度、小尺度现象及动力机制研究仍相对较少。未来结合卫星与数值模式指导的精细化海洋观测, 以及锋面区域的多学科交叉研究仍需加强。锋面生态效应的研究可进一步扩展到食物网层面, 并从定量化的角度去认识中小尺度物理过程在海洋生物地球化学循环中的作用。

参考文献 (References):

- [1] UDA M. Researches on “Siome” or current rip in the seas and oceans[J]. *Geophysical Magazine*, 1938, 11: 307-372.
- [2] FUGLISTER F C. Multiple currents in the Gulf Stream system[J]. *Tellus*, 1951, 3(4): 230-233.
- [3] FUGLISTER F C, WORTHINGTON L V. Some results of a multiple ship survey of the Gulf Stream[J]. *Tellus*, 1951, 3(1): 1-14.
- [4] CROMWELL T, REID J L. A study of oceanic fronts[J]. *Tellus*, 1956, 8(1): 94-101.
- [5] LEVINE E R, WHITE W B. Thermal frontal zones in the eastern Mediterranean Sea[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, 77(6): 1081-1086.
- [6] VOORHIS A D, HERSEY J B. Oceanic thermal fronts in the Sargasso Sea[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1964, 69(18): 3809-3814.
- [7] FEDOROV K N. The physical nature and structure of oceanic fronts[M]. New York, USA: Springer, 1986.
- [8] BELKIN I M, CORNILLON P C, SHERMAN K. Fronts in large marine ecosystems[J]. *Progress In Oceanography*, 2009, 81(1/4): 223-236.
- [9] HOPKINS J, CHALLENGER P, SHAW A G P. A new statistical modeling approach to ocean front detection from SST satellite images[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, 27(1): 173-191.
- [10] BAKUN A. Patterns in the ocean: ocean processes and marine population dynamics[M]. San Diego, California, USA: California Sea Grant, in cooperation with La Paz, Baja California Sur, Mexico: Centro de Investigaciones Biologicas del Noroeste, 1996.
- [11] MARGALEF R. Turbulence and marine life[J]. *Scientia Marina*, 1997, 61(Suppl.1): 109-123.
- [12] BOWMAN M J. Introduction and historical perspective[M]. New York, USA: Springer, 1978.
- [13] PINGREE R D, PUGH P R, HOLLIGAN P M, et al. Summer phytoplankton blooms and red tides along tidal fronts in the approaches to the English Channel[J]. *Nature*, 1975, 258(5537): 672-677.
- [14] FRANKS P J. Phytoplankton blooms at fronts: patterns, scales, and physical forcing mechanisms[J]. *Reviews in Aquatic Sciences*, 1992, 6(2): 121-137.
- [15] RYAN J P, MCMANUS M A, SULLIVAN J M. Interacting physical, chemical and biological forcing of phytoplankton thin-layer variability in Monterey Bay, California[J]. *Continental Shelf Research*, 2010, 30(1): 7-16.
- [16] RUSSELL R W. Precipitation scrubbing of aerial plankton: inferences from bird behavior[J]. *Oecologia*, 1999, 118(3): 381-387.
- [17] BOST C A, COTTÉ C, BAILLEUL F, et al. The importance of oceanographic fronts to marine birds and mammals of the southern oceans[J]. *Journal of Marine Systems*, 2009, 78(3): 363-376.
- [18] OLSON D. Biophysical dynamics of ocean fronts[M]. New York, USA: Wiley, 2002.
- [19] NEVITT G. Olfactory foraging in Antarctic seabirds: a species-specific attraction to krill odors[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1999, 177: 235-241.
- [20] BOWER A S, LOZIER M S. A closer look at particle exchange in the Gulf Stream[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1994, 24(6): 1399-1418.
- [21] BOWER A S, ROSSBY H T, LILLIBRIDGE J L. The Gulf Stream-barrier or blender?[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1985, 15(1): 24-32.
- [22] 苏纪兰. 中国近海的环流动力机制研究[J]. *海洋学报*, 2001, 23(4): 1-16. SU J L. A review of circulation dynamics of the coastal oceans near China[J]. *Haiyang Xuebao*, 2001, 23(4): 1-16.
- [23] HUANG D J, ZHANG T, ZHOU F. Sea-surface temperature fronts in the Yellow and East China Seas from TRMM microwave imager data[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2010, 57(11/12): 1017-1024.
- [24] 赵保仁. 南黄海西部的陆架锋及冷水团锋区环流结构的初步研究[J]. *海洋与湖沼*, 1987, 18(3): 218-226, 313. ZHAO B R. A preliminary study of continental shelf fronts in the western part of southern Huanghai Sea and circulation structure in the front region of the Huanghai Cold Water Mass (HCWM)[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1987, 18(3): 218-226, 313.
- [25] 赵保仁. 黄海潮生陆架锋的分布[J]. *黄渤海海洋*, 1987, 5(2): 16-23. ZHAO B R. The continental shelf fronts induced by tidal mixing in the Huanghai Sea[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1987, 5(2): 16-23.
- [26] 赵保仁, 曹德明, 李徽翡, 等. 渤海的潮混合特征及潮汐锋现象[J]. *海洋学报*, 2001, 23(4): 113-119. ZHAO B R, CAO D M, LI W F, et al. Tidal mixing characters and tidal fronts phenomenons in the Bohai Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2001, 23(4): 113-119.
- [27] NING X, LIU Z, CAI Y, et al. Physicobiological oceanographic remote sensing of the East China Sea: satellite and in situ observation[J].

- Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(C10): 21623-21635.
- [28] HICKOX R, BELKIN I, CORNILLON P, et al. Climatology and seasonal variability of ocean fronts in the East China, Yellow and Bohai seas from satellite SST data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(18): 2945-2948.
- [29] WANG D X, LIU Y, QI Y Q, et al. Seasonal variability of thermal fronts in the northern South China Sea from satellite data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(20): 3963-3966.
- [30] 毛汉礼, 甘子钧, 蓝淑芳. 长江冲淡水及其混合问题的初步探讨[J]. *海洋与湖沼*, 1963, 5(3): 183-206. MAO H L, GAN Z J, LAN S F. A preliminary study of the Yangtze diluted water and its mixing processes[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1963, 5(3): 183-206.
- [31] ZHENG Q A, KLEMAS V. Determination of winter temperature patterns, fronts, and surface currents in the Yellow Sea and East China Sea from satellite imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1982, 12(3): 201-218.
- [32] MA J, QIAO F L, XIA C S, et al. Tidal effects on temperature front in the Yellow Sea[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2004, 22(3): 314-321.
- [33] LÜ X G, QIAO F L, XIA C S, et al. Upwelling and surface cold patches in the Yellow Sea in summer: effects of tidal mixing on the vertical circulation[J]. *Continental Shelf Research*, 2010, 30(6): 620-632.
- [34] WU T N, WU H. Tidal mixing sustains a bottom-trapped river plume and buoyant coastal current on an energetic continental shelf[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(11): 8026-8051.
- [35] 肖晖, 郭小钢, 吴日升. 台湾海峡水文特征研究概述[J]. *台湾海峡*, 2002, 21(1): 126-138. XIAO H, GUO X G, WU R S. Summarization of studies on hydrographic characteristics in Taiwan Strait[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2002, 21(1): 126-138.
- [36] 李立, 郭小钢, 吴日升. 台湾海峡南部的海洋锋[J]. *台湾海峡*, 2000, 19(2): 147-156. LI L, GUO X G, WU R S. Oceanic fronts in southern Taiwan Strait[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2000, 19(2): 147-156.
- [37] HU J Y, KAWAMURA H, TANG D L. Tidal front around the Hainan Island, northwest of the South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2003, 108(C11): 3342-1-3342-6.
- [38] REN S H, XIE J P, ZHU J. The roles of different mechanisms related to the tide-induced fronts in the Yellow Sea in summer[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, 31(5): 1079-1089.
- [39] OU H W. Geostrophic adjustment: a mechanism for frontogenesis[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1984, 14(6): 994-1000.
- [40] 刘先炳, 苏纪兰. 浙江沿岸上升流和沿岸锋面的数值研究[J]. *海洋学报*, 1991, 13(3): 305-314. LIU X B, SU J L. Numerical study of coastal upwelling and fronts in Zhejiang Province[J]. *Haiyang Xuebao*, 1991, 13(3): 305-314.
- [41] 吕新刚, 乔方利, 夏长水, 等. 长江口外及浙江沿岸夏季上升流的潮生机制[J]. *中国科学: D辑 地球科学*, 2007, 37(1): 133-144. LÜ X G, QIAO F L, XIA C S, et al. Tidally induced upwelling off Yangtze River estuary and in Zhejiang coastal waters in summer[J]. *Science in China: Series D Earth Sciences*, 2007, 37(1): 133-144.
- [42] CHEN D, LIU W T, TANG W Q, et al. Air-sea interaction at an oceanic front: implications for frontogenesis and primary production[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(14): 1745-1-1745-4.
- [43] PI Q L, HU J Y. Analysis of sea surface temperature fronts in the Taiwan Strait and its adjacent area using an advanced edge detection method[J]. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53(7): 1008-1016.
- [44] 王磊. 南海北部陆架区域的海洋锋及锋面涡旋研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004. WANG L. A study of fronts and frontal eddies in the northern shelf region of the South China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004.
- [45] YU Y, ZHANG H R, JIN J B, et al. Trends of sea surface temperature and sea surface temperature fronts in the South China Sea during 2003-2017[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(4): 106-115.
- [46] LIN L, LIU D Y, LUO C X, et al. Double fronts in the Yellow Sea in summertime identified using sea surface temperature data of multi-scale ultra-high resolution analysis[J]. *Continental Shelf Research*, 2019, 175: 76-86.
- [47] SAHA K, ZHAO X P, ZHANG H M, et al. AVHRR Pathfinder version 5.3 level 3 collated (L3C) global 4km sea surface temperature for 1981-Present [EB/OL]. (2022-08-11)[2022-06-30]. <https://doi.org/10.7289/v52j68xx>.
- [48] HE S Y, HUANG D J, ZENG D Y. Double SST fronts observed from MODIS data in the East China Sea off the Zhejiang-Fujian coast, China[J]. *Journal of Marine Systems*, 2016, 154(Part A): 93-102.
- [49] YUAN D L, QIAO F L, SU J. Cross-shelf penetrating fronts off the southeast coast of China observed by MODIS[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(19): L19603-1-L19603-4.
- [50] YUAN D L, LI Y, HE L, et al. An observation of the three-dimensional structure of a cross-shelf penetrating front off the Changjiang Mouth[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2010, 57(19/20): 1827-1834.
- [51] REN J L, XUAN J L, WANG Z W, et al. Cross-shelf transport of terrestrial Al enhanced by the transition of northeasterly to southwesterly monsoon wind over the East China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(7): 5054-5073.
- [52] WU H. Cross-shelf penetrating fronts: a response of buoyant coastal water to ambient pycnocline undulation[J]. *Journal of Geophysical Research*

- search: *Oceans*, 2015, 120(7): 5101-5119.
- [53] YIN W B, HUANG D J. Evolution of submesoscale coastal frontal waves in the East China Sea based on geostationary ocean color imager observational data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(18): 9801-9809.
- [54] LARGIER J L. Estuarine fronts: how important are they?[J]. *Estuaries*, 1993, 16(1): 1-11.
- [55] MANN K H, LAZIER J R N. Dynamics of marine ecosystems: biological-physical interactions in the oceans[M]. Oxford, UK: Blackwell Publishing, 2005.
- [56] SMITH W O, DEMASTER D J. Phytoplankton biomass and productivity in the Amazon River plume: correlation with seasonal river discharge[J]. *Continental Shelf Research*, 1996, 16(3): 291-319.
- [57] ACHA E M, PIOLA A, IRIBARNE O, et al. Ecological processes at marine fronts: oases in the ocean[M]. Cham, Germany: Springer International Publishing, 2015.
- [58] DAI Z J, DU J Z, ZHANG X L, et al. Variation of riverine material loads and environmental consequences on the Changjiang (Yangtze) Estuary in recent decades (1955–2008)[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(1): 223-227.
- [59] 刘希真, 李宏亮, 陈建芳, 等. 长江口跨越锋面颗粒磷季节分布变化特征及影响因素[J]. *海洋学研究*, 2011, 29(3): 88-98. LIU X Z, LI H L, CHEN J F, et al. The seasonal variation and influence factors of particulate phosphorus across the frontal surface in Changjiang River Estuary[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2011, 29(3): 88-98.
- [60] 沈焕庭. 我国河口最大浑浊带研究的新认识[J]. *地球科学进展*, 1995, 10(2): 210-212. SHEN H T. New insights on the study of maximum turbidity zone in the estuary of China[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1995, 10(2): 210-212.
- [61] 朱建荣, 王金辉, 沈焕庭, 等. 2003年6月中下旬长江口外海区冲淡水 and 赤潮的观测及分析[J]. *科学通报*, 2005, 50(1): 59-65. ZHU J R, WANG J H, SHEN H T, et al. Observation and analysis of the diluted water and red tide in the sea off the Changjiang River mouth in middle and late June 2003[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(1): 59-65.
- [62] LI W Q, GE J Z, DING P X, et al. Effects of dual fronts on the spatial pattern of chlorophyll-a concentrations in and off the Changjiang River Estuary[J]. *Estuaries and Coasts*, 2021, 44(5): 1408-1418.
- [63] TANG D L, KESTER D R, NI I H, et al. In situ and satellite observations of a harmful algal bloom and water condition at the Pearl River estuary in late autumn 1998[J]. *Harmful Algae*, 2003, 2(2): 89-99.
- [64] 韦钦胜, 王保栋, 陈建芳, 等. 长江口外缺氧区生消过程和机制的再认知[J]. *中国科学: 地球科学*, 2015, 45(2): 187-206. WEI Q S, WANG B D, CHEN J F, et al. Recognition on the forming-vanishing process and underlying mechanisms of the hypoxia off the Yangtze River Estuary[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2015, 45(2): 187-206.
- [65] 韦钦胜, 王保栋, 于志刚, 等. 夏季长江口外缺氧频发的机制及酸化问题初探[J]. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(1): 114-134. WEI Q S, WANG B D, YU Z G, et al. Mechanisms leading to the frequent occurrences of hypoxia and a preliminary analysis of the associated acidification off the Changjiang Estuary in summer[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2017, 47(1): 114-134.
- [66] 周锋, 钱周奕, 刘安琪, 等. 长江口及邻近海域底层水体低氧物理机制的研究进展[J]. *海洋学研究*, 2021, 39(4): 22-38. ZHOU F, QIAN Z Y, LIU A Q, et al. Recent progress on the studies of the physical mechanisms of hypoxia off the Changjiang (Yangtze River) Estuary[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2021, 39(4): 22-38.
- [67] WU H, ZHU J R, SHEN J, et al. Tidal modulation on the Changjiang River plume in summer[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C8): C08017-1-C08017-21.
- [68] XUAN J L, HUANG D J, ZHOU F, et al. The role of wind on the detachment of low salinity water in the Changjiang Estuary in summer[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C10): C10004-1-C10004-17.
- [69] WEI Q S, WANG B D, ZHANG X L, et al. Contribution of the offshore detached Changjiang (Yangtze River) Diluted Water to the formation of hypoxia in summer[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 764: 142838-1-142838-11.
- [70] WEI Q S, YU Z G, WANG B D, et al. Offshore detachment of the Changjiang River plume and its ecological impacts in summer[J]. *Journal of Oceanography*, 2017, 73(3): 277-294.
- [71] TSENG Y F, LIN J, DAI M, et al. Joint effect of freshwater plume and coastal upwelling on phytoplankton growth off the Changjiang River[J]. *Biogeosciences*, 2014, 11(2): 409-423.
- [72] WEI Q S, YAO P, XU B C, et al. Coastal upwelling combined with the river plume regulates hypoxia in the Changjiang Estuary and adjacent inner East China Sea shelf[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2021, 126(11): e2021JC017740-1- e2021JC017740-19.
- [73] LI D W, NI X B, WANG K, et al. Biological CO₂ uptake and upwelling regulate the air-sea CO₂ flux in the Changjiang plume under south winds in summer[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8: 709783-1-709783-11.
- [74] 余小青, 金海燕, 陈建芳, 等. 2009年初夏长江口及毗邻海区表层浮游植物群落结构的色素表征[J]. *海洋学研究*, 2011, 29(3): 145-154. YU X Q, JIN H Y, CHEN J F, et al. Phytoplankton community structures revealed by pigment signatures in Changjiang River Estuary and its adjacent sea areas in summer 2009[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2011, 29(3): 145-154.

- [75] ZHU Z Y, NG W M, LIU S M, et al. Estuarine phytoplankton dynamics and shift of limiting factors: a study in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and adjacent area[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, 84(3): 393-401.
- [76] PAN L A, ZHANG L H, ZHANG J, et al. On-board flow cytometric observation of picoplankton community structure in the East China Sea during the fall of different years[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2005, 52(2): 243-253.
- [77] QIU D J, HUANG L M, ZHANG J L, et al. Phytoplankton dynamics in and near the highly eutrophic Pearl River Estuary, South China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2010, 30(2): 177-186.
- [78] LI Q P, GE Z M, LIU Z J, et al. Transparent exopolymer particles in a coastal frontal zone of the northern South China Sea and the associated biogeochemical implications[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, 126(2): e2020JG005893-1-e2020JG005893-14.
- [79] QIAO S Q, SHI X F, WANG G Q, et al. Sediment accumulation and budget in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. *Marine Geology*, 2017, 390: 270-281.
- [80] DENG B, ZHANG J, WU Y. Recent sediment accumulation and carbon burial in the East China Sea[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20(3): GB3014-1-GB3014-12.
- [81] ZHAO B, YAO P, BIANCHI T S, et al. Controls on organic carbon burial in the Eastern China marginal seas: A regional synthesis[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2021, 35(4): e2020GB006608-1-e2020GB006608-27.
- [82] 吴卫华, 郑洪波, 杨杰东, 等. 中国河流流域化学风化和全球碳循环[J]. *第四纪研究*, 2011, 31(3): 397-407. WU W H, ZHENG H B, YANG J D, et al. Chemical weathering of large river catchments in China and the global carbon cycle[J]. *Quaternary Sciences*, 2011, 31(3): 397-407.
- [83] GARRETT C J R, LODER J W. Dynamical aspects of shallow sea fronts[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, 1981, 302(1472): 563-581.
- [84] PRINGLE J M, FRANKS P J S. Asymmetric mixing transport: A horizontal transport mechanism for sinking plankton and sediment in tidal flows[J]. *Limnology and Oceanography*, 2001, 46(2): 381-391.
- [85] CHEN C S, SCHLITZ R J, LOUGH R G, et al. Wind-induced, cross-frontal exchange on Georges Bank: A mechanism for early summer on-bank biological particle transport[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2003, 108(C11): 8011-1-8011-12.
- [86] CADIER M, GORGUES T, LHELGUEN S, et al. Tidal cycle control of biogeochemical and ecological properties of a macrotidal ecosystem[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(16): 8453-8462.
- [87] 赵保仁. 黄海冷水团锋面与潮混合[J]. *海洋与湖沼*, 1985, 16(6): 451-460. ZHAO B R. The fronts of the Huanghai Sea Cold Water Mass induced by tidal mixing[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1985, 16(6): 451-460.
- [88] WEI Q S, YU Z G, WANG B D, et al. Coupling of the spatial-temporal distributions of nutrients and physical conditions in the southern Yellow Sea[J]. *Journal of Marine Systems*, 2016, 156: 30-45.
- [89] 王保栋. 黄海冷水域生源要素的变化特征及相互关系[J]. *海洋学报*, 2000, 22(6): 47-54. WANG B D. Characteristics of variations and interrelations of biogenic elements in the Huanghai Sea Cold Water Mass[J]. *Haiyang Xuebao*, 2000, 22(6): 47-54.
- [90] WEI Q S, FU M Z, SUN J C, et al. Seasonal physical fronts and associated biogeochemical-ecological effects off the Jiangsu Shoal in the western Yellow Sea, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(10): e2020JC016304-1-e2020JC016304-19.
- [91] YU Y, ZHANG W C, ZHANG C X, et al. Basin-scale variation in planktonic ciliate distribution: a detailed temporal and spatial study of the Yellow Sea[J]. *Marine Biology Research*, 2014, 10(7): 641-654.
- [92] 韦钦胜, 傅明珠, 李艳, 等. 南黄海冷水团海域溶解氧和叶绿素最大现象值及营养盐累积的季节演变[J]. *海洋学报*, 2013, 35(4): 142-154. WEI Q S, FU M Z, LI Y, et al. Observation of the seasonal evolution of DO, chlorophyll a maximum phenomena and nutrient accumulating in the Southern Huanghai (Yellow) Sea cold water mass area[J]. *Haiyang Xuebao*, 2013, 35(4): 142-154.
- [93] WEI Q S, FU M Z, LI X S, et al. Front-driven physical-biogeochemical-ecological interactions in the Yellow Sea large marine ecosystem[M]//BARCELÓ D, KOSTIANOV A G. The handbook of environmental chemistry. Berlin, Heidelberg: Springer, 2022.
- [94] 藏政晨, 王厚杰, 薛佐, 等. 黄海近岸锋面的时空变化及其对沉积物输运和沉积的影响[J]. *海洋地质前沿*, 2015, 31(7): 1-10. ZANG Z C, WANG H J, XUE Z, et al. Temporal and spatial variability of nearshore fronts in the Yellow Sea and its influence on sediment transport and deposition[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2015, 31(7): 1-10.
- [95] 朱颖涛, 冯秀丽, 朱龙海, 等. 山东半岛东北部海域悬浮体季节分布及控制因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(2): 30-42. ZHU Y T, FENG X L, ZHU L H, et al. Seasonal distribution of suspended sediments in the water northeast to Shandong Peninsula and its controlling factors[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(2): 30-42.
- [96] WANG A M, RALSTON D K, BI N S, et al. Seasonal variation in sediment transport and deposition on a muddy clinoform in the Yellow Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2019, 179: 37-51.
- [97] LÜ T, LIU D Y, ZHOU P, et al. The coastal front modulates the timing and magnitude of spring phytoplankton bloom in the Yellow Sea[J]. *Water Research*, 2022, 220: 118669-1-118669-10.
- [98] 胡好国, 万振文, 袁业立. 南黄海浮游植物季节性变化的数值模拟与影响因子分析[J]. *海洋学报*, 2004, 26(6): 74-88. HU H G, WAN Z W, YUAN

- Y L. Simulation of seasonal variation of phytoplankton in the southern Huanghai (Yellow) Sea and analysis on its influential factors[J]. *Haiyang Xuebao*, 2004, 26(6): 74-88.
- [99] WEI Q S, LI X S, WANG B D, et al. Seasonally chemical hydrology and ecological responses in frontal zone of the central Southern Yellow Sea[J]. *Journal of Sea Research*, 2016, 112: 1-12.
- [100] 韦钦胜, 葛人峰, 臧家业, 等. 夏季南黄海跨锋断面的生态环境特征及锋区生态系的提出[J]. *海洋学报*, 2011, 33(3): 74-84. WEI Q S, GE R F, ZANG J Y, et al. Characteristics of the ecological environment in cross-frontal sections and a viewpoint of the frontal region ecosystem in the southern Huanghai Sea in summer[J]. *Haiyang Xuebao*, 2011, 33(3): 74-84.
- [101] 韦钦胜, 吕新刚, 王宗兴, 等. 黄海陆架锋特征及其生态效应的初步分析[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(4): 435-443. WEI Q S, LÜ X G, WANG Z X, et al. A preliminary analysis of the characteristics of the continental shelf front and its ecological effects in the Yellow Sea[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(4): 435-443.
- [102] HU J Y, WANG X H. Progress on upwelling studies in the China seas[J]. *Reviews of Geophysics*, 2016, 54(3): 653-673.
- [103] YANG D Z, YIN B S, CHAI F, et al. The onshore intrusion of Kuroshio subsurface water from February to July and a mechanism for the intrusion variation[J]. *Progress in Oceanography*, 2018, 167: 97-115.
- [104] XU L J, YANG D Z, GREENWOOD J, et al. Riverine and oceanic nutrients govern different algal bloom domain near the Changjiang Estuary in summer[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, 125(10): e2020JG005727-1-e2020JG005727-26.
- [105] LIU K K, TANG T Y, GONG G C, et al. Cross-shelf and along-shelf nutrient fluxes derived from flow fields and chemical hydrography observed in the southern East China Sea off northern Taiwan[J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20(4): 493-523.
- [106] YANG D Z, YIN B S, SUN J C, et al. Numerical study on the origins and the forcing mechanism of the phosphate in upwelling areas off the coast of Zhejiang province, China in summer[J]. *Journal of Marine Systems*, 2013, 123/124: 1-18.
- [107] 周名江, 朱明远. “我国近海有害赤潮发生的生态学、海洋学机制及预测防治”研究进展[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(7): 673-679, 764-765. ZHOU M J, ZHU M Y. Progress of the project "Ecology and oceanography of harmful algal blooms in China"[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(7): 673-679, 764-765.
- [108] XU L J, YANG D Z, YU R C, et al. Nonlocal population sources triggering dinoflagellate blooms in the Changjiang Estuary and adjacent seas: a modeling study[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, 126(11): e2021JG006424-1-e2021JG006424-19.
- [109] DAI X F, LU D D, GUAN W B, et al. The correlation between *Prorocentrum donghaiense* blooms and the Taiwan warm current in the East China Sea-evidence for the “pelagic seed bank” hypothesis[J]. *PLoS One*, 2013, 8(5): e64188-1-e64188-8.
- [110] 曾宇兰, 陆斗定, 王鹏斌, 等. 东海原甲藻藻华和台湾暖流种源关系的进一步研究[J]. *海洋学研究*, 2020, 38(2): 38-48. ZENG Y L, LU D D, WANG P B, et al. Advanced researches on the relationship between *Prorocentrum donghaiense* Lu blooms and the Taiwan warm current[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2020, 38(2): 38-48.
- [111] CHAPMAN D C, LENTZ S J. Trapping of a coastal density front by the bottom boundary layer[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1994, 24(7): 1464-1479.
- [112] HOUGHTON R W, AIKMAN F, OU H W. Shelf-slope frontal structure and cross-shelf exchange at the New England shelf-break[J]. *Continental Shelf Research*, 1988, 8(5/7): 687-710.
- [113] DICKSON R R, GURBUTT P A, PILLAI V N. Satellite evidence of enhanced upwelling along the European continental slope[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1980, 10(5): 813-819.
- [114] SHARPLES J, MOORE C M, HICKMAN A E, et al. Internal tidal mixing as a control on continental margin ecosystems[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L23603-1-L23603-5.
- [115] WALLACE J M, MITCHELL T P, DESER C. The influence of sea-surface temperature on surface wind in the eastern equatorial Pacific: seasonal and interannual variability[J]. *Journal of Climate*, 1989, 2(12): 1492-1499.
- [116] XIE S P, HAFNER J, TANIMOTO Y, et al. Bathymetric effect on the winter sea surface temperature and climate of the Yellow and East China Seas[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(24): 2228-81-1-2228-81-4.
- [117] BOYD P, LAROCHE J, GALL M, et al. Role of iron, light, and silicate in controlling algal biomass in subantarctic waters SE of New Zealand[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1999, 104(C6): 13395-13408.
- [118] LIVINGSTON M E. Links between climate variation and the year class strength of New Zealand hoki (*Macruronus novaezelandiae*) Hector[J]. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 2000, 34(1): 55-69.
- [119] 费尊乐, 毛兴华, 吕瑞华, 等. 东海黑潮区叶绿素a和初级生产力的分布特征[M]. 北京: 海洋出版社, 1987. FEI Z L, MAO X H, LÜ R H, et al. Distributional characteristics of chlorophyll a and primary productivity in the Kuroshio area of the East China Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 1987.
- [120] 费尊乐, 朱明远. 次表层叶绿素a极大值(SCM)分布与其光-营养盐环境相关关系的研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1990. FEI Z L, ZHU M Y. The study on subsurface chlorophyll-a maximum (SCM) and its relationship with light and nutrients[M]. Beijing: China Ocean Press, 1990.

- [121] 陆赛英. 东海北部叶绿素a极大值的分布规律[J]. 海洋学报, 1998, 20(3): 64-75. LU S Y. Chlorophyll a maximum distribution and variability in the northern East China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 1998, 20(3): 64-75.
- [122] 郭炳火, 葛人峰. 东海黑潮锋面涡旋在陆架水与黑潮水交换中的作用[J]. 海洋学报, 1997, 19(6): 1-11. GUO B H, GE R F. Role of Kuroshio frontal eddy in exchange between shelf water and Kuroshio water in East China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 1997, 19(6): 1-11.
- [123] LIU F, TANG S, CHEN C. Satellite observations of the small-scale cyclonic eddies in the western South China Sea[J]. *Biogeosciences*, 2015, 12(2): 299-305.
- [124] YU J, ZHENG Q A, JING Z Y, et al. Satellite observations of sub-mesoscale vortex trains in the western boundary of the South China Sea[J]. *Journal of Marine Systems*, 2018, 183: 56-62.
- [125] 黄小龙, 经志友, 郑瑞玺, 等. 南海西部夏季上升流锋面的次中尺度特征分析[J]. 热带海洋学报, 2020, 39(3): 1-9. HUANG X L, JING Z Y, ZHENG R X, et al. Analysis of submesoscale characteristics of summer upwelling fronts in the western South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2020, 39(3): 1-9.
- [126] 叶鹏, 宣基亮, 黄大吉. 夏季浙闽沿岸穿刺锋面生消演变过程及其动力机制的探讨[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(4): 634-648. YE P, XUAN J L, HUANG D J. Evolution and dynamics of a summertime penetrating front off the Zhejiang-Fujian Coast, China[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2022, 52(4): 634-648.
- [127] LONGHURST A R. Ecological geography of the sea[M]. Burlington, USA: Academic Press, 2006.
- [128] LIU X, CHIANG K P, LIU S M, et al. Influence of the Yellow Sea Warm Current on phytoplankton community in the central Yellow Sea[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2015, 106: 17-29.
- [129] FU M Z, WANG Z L, LI Y, et al. Phytoplankton biomass size structure and its regulation in the Southern Yellow Sea (China): seasonal variability[J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29(18): 2178-2194.
- [130] 陈纪新, 黄邦钦, 刘媛, 等. 应用特征光合色素研究东海和南海北部浮游植物的群落结构[J]. 地球科学进展, 2006, 21(7): 738-746. CHEN J X, HUANG B Q, LIU Y, et al. Phytoplankton community structure in the transects across East China Sea and Northern South China Sea determined by analysis of HPLC photosynthetic pigment signatures[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(7): 738-746.
- [131] XIAO W P, WANG L, LAWS E, et al. Realized niches explain spatial gradients in seasonal abundance of phytoplankton groups in the South China Sea[J]. *Progress in Oceanography*, 2018, 162: 223-239.
- [132] WEI Q S, WANG B D, YAO Q Z, et al. Hydro-biogeochemical processes and their implications for *Ulva prolifera* blooms and expansion in the world's largest green tide occurrence region (Yellow Sea, China)[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 645: 257-266.
- [133] QI L, HU C M, LIU J Q, et al. Noctiluca blooms in the East China Sea bounded by ocean fronts[J]. *Harmful Algae*, 2022, 112: 102172-1-102172-8.
- [134] LIU D Y, WANG Y N, WANG Y Q, et al. Ocean fronts construct spatial zonation in microfossil assemblages[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2018, 27(10): 1225-1237.

Review of Fronts and Its Ecological Effects in the Shelf Sea of China

LIU Dong-yan^{1,2}, LÜ Ting¹, LIN Lei³, WEI Qin-sheng⁴

(1. *State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China;*

2. Institute of Eco-Chongming, East China Normal University, Shanghai 200241, China;

3. College of Ocean Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

4. Key Laboratory of Marine Eco-Environmental Science and Technology, First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China)

Abstract: Ocean fronts exist at the boundaries of two or more water masses with distinct characteristics. The secondary circulation and convergence on the front can significantly affect marine matter transport and biological production. In the marginal seas of China (MSC), there are fourteen typical fronts (including Bohai Strait Front, Shandong Peninsula Coastal Front, Jiangsu Coastal Front, Seohan Bay Front, Kyunggi Bay Front, Western Chejudo Front, Yangtze Bank Ring Front, Min-Zhe Coastal Front, Kuroshio Front, Taiwan Bank Front, Min-Yue Coastal Front, Estuarine Front of Pear River, Coastal Front of Eastern Hainan Island, and Coastal Front of Beibu Gulf). Meanwhile, sub-mesoscale and small-scale processes such as double fronts, penetrating fronts, and frontal waves were observed in these frontal zones. Together with shelf circulation and other meso- and sub-mesoscale processes (such as eddies, internal waves, etc.), fronts control the transport and exchange of matters and energy in the MSC. Previous studies have found that the transport of matters along and across the front played a crucial role in the seasonal biogeochemical cycle and biological process in the MSC. From winter to spring, the frontal relax can enhance the transport of nutrients from the nearshore to the shelf, and modulate the timing and magnitude of the spring phytoplankton blooms. From summer to autumn, the convergence effect and the secondary circulation from fronts (e.g., estuarine fronts and the fronts formed around the Yellow Sea Cold Water Mass) can significantly increase the nutrient and light levels and play an important role in promoting the growth and aggregation of phytoplankton. In the eutrophic estuaries and coastal waters, the frontal zone can be a hot-pot of red tide or hypoxia. In addition, the physical barrier effect of the front maintains relatively independent physical and biogeochemical characteristics for the water masses of both sides, and front thus plays an important role in the biogeographical zonation, and the biodiversity gradients in the MSC. Based on our understanding to frontal effects on the biogeochemical cycling and biological production in the MSC, it is necessary to carry out the ocean observations for the fine structure and variability of the fronts, the frontal sub-mesoscale and small-scale processes, combined with high-resolution satellite data and numerical models. The ecological effects from sub-mesoscale and small-scale processes deserved a deep exploration via an interdisciplinary method.

Key words: estuarine front; coastal front; shelf front; phytoplankton; nutrients; habitat zonation

Received: July 19, 2022