

文章编号: 1674-5566(2025)05-1171-15

DOI:10.12024/jsou.20250404817

杭州湾沉积物中生物群落-生境要素-污染物分布特征及响应规律

刘思如, 刘昕怡, 袁佳文, 毛佳丽, 丰美萍, 王丽芳, 林 田

(上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院, 上海 201306)

摘 要: 通过环境DNA技术(Environmental DNA, eDNA)与理化参数分析, 系统解析了杭州湾表层沉积物中生物群落结构、生境要素及污染物的空间分布特征及其对生物多样性的影响。结果表明, 杭州湾表层沉积物中共鉴定出53门生物类群, 后生动物占据主导地位(42.55%), 其中三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)为绝对优势种(20.84%), 群落呈现显著的关键种驱动特征。生物多样性空间分异显著: 丰富度指数 Observed species (513~3 169)、Chao1 (777.33~4 185.46) 由北向南呈递减趋势, 均匀度指数 Pielou J (0.05~0.79) 和多样性指数 Shannon (0.31~6.01) 均呈现北部高、中部低、南部略高的趋势。沉积物粒度[以粉粒为主, (70.72±1.94)%]与 TOC [(0.20±0.06)%]、TN [(0.06±0.01)%] 的空间分异显示: 粗颗粒底质通过优化蟹类栖息条件驱动群落单一化, 而 C/N (3.12±0.83) 指示海源有机质主导, TOC 和 TN 高值区与藻类和原生动物优势吻合。污染物分析表明: 杭州湾沉积物中污染物总体呈现离岸扩散梯度降低特征, 其中 DDTs [(9.45±1.68) ng/g], 溴代阻燃剂[以 NBFRs 为主 (76.7%)], PBDEs (BDE209 比重超过 71%), 全氟及多氟烷基物质 (PFCA 占比 87.9%) 因高水溶性, 沉积物中分布相对均一。潮汐动力与陆源排放塑造了生境要素和污染物的空间异质性。研究通过整合宏观尺度冗余分析(RDA)与微观生态机制解析, 构建了杭州湾“格局-机制”协同验证体系。宏观层面揭示生物群落多样性对多维环境梯度的响应规律, 微观层面阐明污染物与环境因子对功能群落的差异驱动作用。二者互证表明, 跨尺度互馈机制是解析生态系统涌现性特征的核心路径, 为大型强潮河口生态系统的多压力协同管理提供了科学依据。

关键词: 沉积物; 生物群落; 生境要素; 污染物; 生物多样性; 冗余分析; 杭州湾

中图分类号: Q 178; X55; X 171.1

文献标志码: A

河口沉积物作为水陆交错带的生态界面, 其环境异质性深刻影响着底栖生物群落的演替格局^[1]。这一特殊介质不仅承载着流域污染物迁移转化的地球化学记忆, 其粒度组成与有机质含量的时空分异也是维系区域生态系统功能的关键生境要素^[2]。在人类世 (Anthropocene) 背景下, 高强度开发活动引发的复合污染已超越自然演替阈值, 导致全球河口生态系统呈现生物同质化趋势^[3-4]。特别是在强潮汐动力体系内, 沉积物-污染物-生物的耦合作用机制呈现显著非线性特征——潮汐泵效应加速污染物再悬浮^[5], 而沉积动力分选作用则通过粒径分异调控污染物赋存形态^[6-7], 这种双重机制使传统基于稳态假设的环境评估体系面临严峻挑战。

聚焦杭州湾这一东亚典型强潮河口, 其喇叭状地形对长江/钱塘江径流与东海潮涌形成动力辐聚, 以致潮差特征达 5.7 m^[8]。独特的水文格局驱动沉积物呈现昼夜尺度的动态平衡: 涨潮期细颗粒物质向陆输运, 落潮期粗颗粒向海扩散。这种周期性扰动不仅导致有机污染物呈现“源-汇”转换特征, 更通过改变底质渗透性影响生物生命活动^[9]。值得注意的是, 本区域作为长三角经济枢纽, 承受着工业和农业复合压力^[10], 其次氟/氯/溴代污染物因其环境持久性与生物累积性, 已成为新兴生态风险因子^[11]。近年来, eDNA 技术革新了生物多样性监测范式。该技术通过捕获环境介质 (水、沉积物等) 中的游离 DNA 片段, 结合高通量测序与生物信息学分析, 突破分类鉴定瓶

收稿日期: 2025-04-02 修回日期: 2025-05-11

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFD2401901); 国家自然科学基金 (42476245)

作者简介: 刘思如 (1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为环境地球化学。E-mail: 15648012044@163.com

通信作者: 刘昕怡, E-mail: d240300077@st.shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部 (CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

颈,揭示生物多样性,有效探测低丰度/暂居物种的生态足迹,耦合环境参数与分子数据,支持多维度生态互作机制解析^[12]。

当前研究存在三重认知局限:其一,现有质量评估体系多采用还原论范式,割裂了沉积理化参数-污染物复合暴露-生物多样性响应的级联关系^[13];其二,对新型污染物与传统污染物的生态效应差异缺乏系统解构;其三,传统形态分类法难以解析微生物功能群的胁迫响应机制。本研究通过测定沉积物的粒度组成、总有机碳(TOC)和总氮(TN)以及氟、氯、溴3种典型卤代污染物的含量,结合沉积物DNA宏系统分类学技术,系统研究了杭州湾表层沉积物中生物多样性对生境要素和污染物的生态响应。同时,对比分析了“新型”与“传统”污染物对生物多样性的影响差异,旨在揭示主要污染物的生态效应及其生物指示作用。通过选取与污染赋存情况显著相关的生物多样性指数,突破传统生物监测的线性范式,本研究为评价近海生物多样性提供新的视

角,揭示潮汐扰动下“物理筛选-化学吸附-生物适应”的协同作用机制。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

样品于2023年8月在杭州湾近海海域(经度范围:121.6°E~122.6°E,纬度范围:30.2°N~30.8°N)通过科考航次采集。航次设置30个调查站位,各站位的分布如图1所示。表层沉积物样品使用50 cm×50 cm的箱式取样器采集,获取的表层沉积物包裹在铝箔自封袋中于-20℃冰箱中冷冻保存。

沉积物样品在-50℃条件下冻干以去除水分。冻干后的沉积物样品,过20目尼龙网筛滤去其中杂质,再次混匀后取5 g沉积样品置于50 mL无菌离心管中,用于分子生态学分析,长期保存于-80℃超低温冰箱中。其余样品用于沉积物物理化学参数分析。

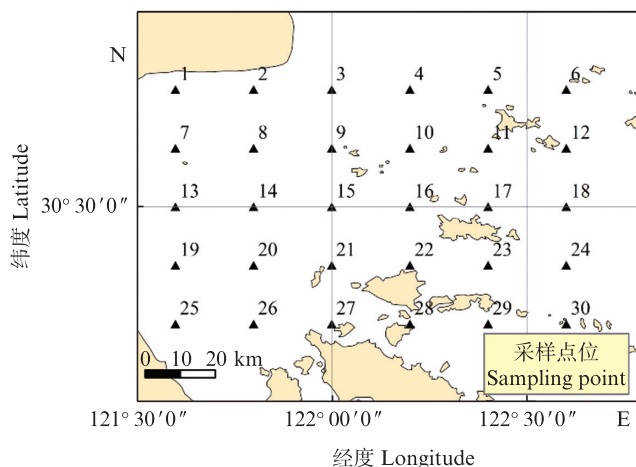


图1 杭州湾表层沉积物采集站点图

Fig. 1 Surface sediment collection site map of Hangzhou Bay

1.2 环境DNA提取、扩增及测序

采用eDNA技术对生物群落组成进行分析,具体步骤包括DNA抽提、聚合酶链式反应(PCR)扩增、荧光定量、Illumina文库构建和Illumina测序。完成基因组DNA抽提后,利用1%琼脂糖凝胶电泳检测抽提的基因组DNA。使用引物1380F-1510R,引物的测序区域为18SrRNA(V9)、m1CO1intF-jgHCO2198引物的测序区域为CO I基因,按指定测序区域,合成特异引物,确保该引物能在最低循环数中使绝大多数样本扩

增出浓度合适的产物。每个样本做3个重复,将同一样本的PCR产物混合后用2%琼脂糖凝胶电泳检测,使用AxyPrepDNA凝胶回收试剂盒(AXYGEN公司)切胶回收PCR产物,Tris HCl洗脱;2%琼脂糖电泳检测。参照电泳初步定量结果,将PCR产物用蓝色荧光定量系统(Promega公司)进行检测定量,之后按照每个样本的测序量要求,进行相应比例的混合。最后进行文库构建和测序。以上步骤由上海凌恩生物科技有限公司完成。

1.3 污染物和生境要素的测定

冻干后的样品先进行研磨,取 5 g 使用加速溶剂萃取(ASE)法处理有机氯农药(主要是滴滴涕 DDTs、六六六 HCHs)和溴代阻燃剂(多溴联苯醚 PBDEs、新型溴代阻燃剂 NBFRs),加入 TCMX、 ^{13}C -PCB-11+155+206、BDE-138 作为回收率指示剂,溶剂为二氯甲烷和正己烷(V:V=1:1),萃取温度 100 °C,萃取压力 10.34 MPa,加热平衡 5 min,萃取时间 5 min,循环次数 2 次,氮吹时间 60 s,冲洗体积为萃取罐体积的 60%。在提取过程结束时,样品通过旋转蒸馏浓缩至 1~2 mL,随后,用正己烷在中性硅胶柱上用 20 mL 二氯甲烷和正己烷洗脱液进行溶剂转化。将带样品的裂解液用温和的氮气流浓缩至 500 μL ,转移到 2 mL 的进样瓶中。仪器分析前加入 ^{13}C -PCB141 和 BDE-77 分别作为有机氯农药和溴代阻燃剂的内标物。采用岛津 TQ8050NX 气相色谱-串联质谱仪(GC-MS)和电离源(EI)进行测定。色谱柱为 DB-5MS(30 m \times 250 μm \times 0.25 μm ; Agilent Technologies, USA),采用不分流进样,进样量为 1 μL 。载气为高纯氮气,流速为 1.3 mL/min,离子源温度为 250 °C,溶剂截止时间为 6.5 min。初始温度为 100 °C,保持 2 min 后,以 15 °C/min 的速度迅速升温到 210 °C,保持 2 min,接着以 2 °C/min 的速度升温到 230 °C,然后以 10 °C/min 的速度升温到 300 °C,保持 5 min。质谱分析采用多反应监测模式(MRM)进行定量分析。

全氟及多氟烷基物质(包括全氟磺酸 PFSA、全氟羧酸 PFCA、新型氟化物 Emerging PFAS)前处理是称取 3.0 g 冷干研磨后的沉积物加入聚丙烯离心管,加入 2 ng 内标,用 10 mL 0.2% NH_4OH 溶液超声提取 15 min,重复 3 次,合并上清液,经 Envi-Carb 柱净化后,氮吹浓缩至 200 μL 。

使用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000, Marlvén, UK)测定沉积物粒度组成,并按其粒度大小划分为黏粒(clay, <0.002 mm)、粉粒(silt, 0.002~0.063 mm)和砂粒(sand, 0.063~2 mm)。使用元素分析仪(Vario Max CN, Elementar, Germany)检测沉积物中总有机碳(TOC)与总氮(TN)含量。

1.4 质量控制和保证(QA/QC)

整个过程中增加实验室空白(监控整个实验过程是否有污染物)、空白加标(监测目标化合物的回

收率)、样品平行样(考查分析结果的重复性及分析方法的精度)等质量保证与质量控制(QA/QC)样品,每个分析样品(包括 QA/QC 样品)都添加回收率指示标样。GC-MS 上机测样时,每测 10 个样品加入 1 个质控样品来确保仪器运行的稳定。检出限的计算方法是空白平均值加 3 倍的空白标准偏差。eDNA 技术在检测过程中做了相应的质量控制,全部样本按照正式实验条件进行,PE250 测序序列首先需要根据 barcode 得到所有样品的有效序列;然后对 reads 的质量进行质控过滤。每个样本做 3 个重复。

1.5 计算与数据处理

使用 R 语言计算多样性指数(包括 Observed species、Chao1、Pielou J 和 Shannon),其中 Observed species 和 Chao1 代表丰富度, Pielou J 代表均匀度, Shannon 代表多样性。利用 Canoco 5 软件完成 RDA 图的绘制。利用 ArcGIS 10.8 中的 Kriging 插值方法完成了空间分布图的绘制。

2 结果与讨论

2.1 物种组成和多样性分析

30 个沉积物样本经 eDNA 技术,除去未知分类,共测得 53 种门类的生物类群,其中后生动物 21 门占据主导(42.55%),原生动物 16 门(16.90%)、藻类 7 门(15.35%)以及真菌 9 门(1.31%)。优势种结果分析表明,三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)的个体数最多,占总个体数的 20.84%,其次为丝状异毛虫(*Heteromastus filiformis*)(6.12%)、中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)(5.77%)、太平洋亚历山大藻(*Alexandrium pacificum*)(4.09%)、大黄鱼(*Larimichthys crocea*)(3.15%)、偏心圆筛藻(*Thalassiosira eccentrica*)(2.79%)、东海斯氏藻(*Scrippsiella donghaiensis*)(2.58%)、奇异囊沟藻(*Cystoditrium paradoxigomosa*)(1.77%)、沥青乳管藻(*Bittuminaria bituminosa*)(1.62%)、寄生甲藻(*Amoebophrya* sp)(1.10%),以上 10 个物种占总体物种丰富度的 49.82%,群落结构呈现显著的优势种聚集现象。这一组成特征表明,研究区域可能受特定环境(如底质类型、营养供给或人类活动)的强烈选择压力,导致群落呈现典型的关键种驱动型结构(表 1, 图 2)。

表 1 基于 eDNA 技术在杭州湾区域的生物检出情况
Tab. 1 Biological detection based on eDNA in Hangzhou Bay

界 Kingdom	门 Phylum	相对丰富度 Relative abundance/%
后生动物 Metazoa	节肢动物门 Arthropoda	27.74
	环节动物门 Annelida	6.22
	线虫动物门 Nematoda	4.46
	脊索动物门 Chordata	3.20
	扁形动物门 Platyhelminthes	0.30
	异无腔动物门 Xenacoelomorpha	0.25
	刺胞动物门 Cnidaria	0.21
	动物动物门 Kinorhyncha	0.06
	腹毛动物门 Gastrotricha	0.05
	软体动物门 Mollusca	0.03
	苔藓动物门 Bryozoa	0.02
	栉水母动物门 Ctenophora	0.01
	半索动物门 Hemichordata	<0.01
	多孔动物门 Porifera	<0.01
	轮虫动物门 Rotifera	<0.01
	二胚虫门 Dicyemida	<0.01
	棘皮动物门 Echinodermata	<0.01
	腕足动物门 Brachiopoda	<0.01
	纽形动物门 Nemertea	<0.01
	扁盘动物门 Placozoa	<0.01
	缓步动物门 Tardigrada	<0.01
原生动物 Protozoa	纤毛虫门 Ciliophora	9.61
	盘螭虫纲 Discosea	1.85
	丝足虫门 Cercozoa	1.38
	顶复门 Apicomplexa	0.92
	内黏虫门 Endomyxa	0.86
	有孔虫门 Foraminifera	0.81
	真虫类 Evosea	0.71
	管足虫纲 Tubulinea	0.44
	雾虫纲 Nebulidia	0.09
	半鞭毛虫门 Hemimastigophora	0.09
	异叶足纲 Heterolobosea	0.08
	皮寇虫门 Picozoa	0.02
	内基体门 Fornicata	0.02
	副基体门 Parabasalia	0.01
	帕金虫门 Perkinsozoa	0.01
	前轴柱虫类 Preaxostyla	<0.01
藻类 Algae	硅藻门 Bacillariophyta	7.21
	链形植物门 Streptophyta	3.51
	眼虫门 Euglenozoa	2.13
	绿藻门 Chlorophyta	1.40
	红藻门 Rhodophyta	0.83
	定鞭藻门 Haptophyta	0.26
真菌 Fungi	皮拉逊藻门 Prasinodermophyta	0.01
	卵菌门 Oomycota	0.54
	子囊菌门 Ascomycota	0.33
	担子菌门 Basidiomycota	0.20
	毛霉菌门 Mucoromycota	0.12
	壶菌门 Chytridiomycota	0.07
	捕虫菌门 Zoopagomycota	0.05
	隐真菌门 Cryptomycota	<0.01
	微孢子虫门 Microsporidia	<0.01
未知 Unclassified	芽枝霉门 Blastocladiomycota	<0.01
	未知 unknow	23.88

进一步结合生物多样性与空间异质性分析, 深入讨论该区域底栖生物群落的稳定性与特征性。生物多样性分析结果表明, 丰富度方面: 丰富度指数总数范围为 513~3 169, Chao1 为 777.33~4 185.46(图 3), 两者变化趋势高度一致 ($P<0.01$, $R^2=0.893$), 表明测序深度足以反映群落的物种组成特征。空间分布上, 杭州湾物种数量

和丰富度都是由北向南呈现递减趋势, 东北部区域的物种丰富度显著高于其他区域, 其中点位 4、5、6 在物种丰富度组成结构上高度相似(图 2), 可能因为这些区域有丰富的食物资源、合适的栖息地, 其类似环境条件更适宜多种生物生存。

代表群落物种均匀度的 Pielou J 为 0.05~0.79, 东北部和南部(近舟山群岛主岛)区域数值

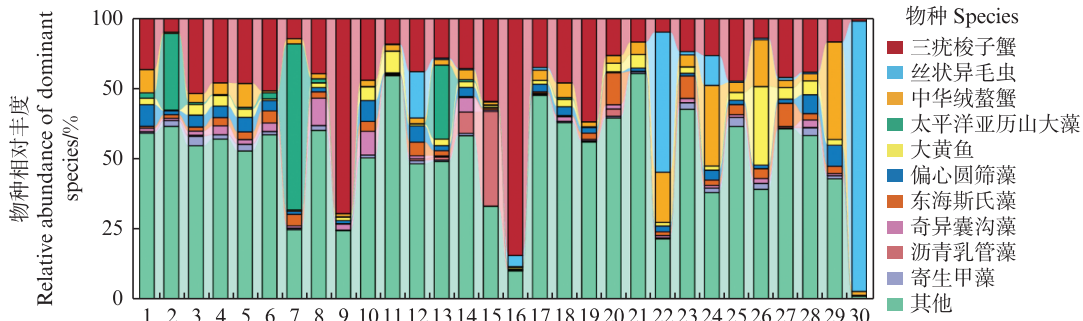


图 2 杭州湾各点位优势物种组成

Fig. 2 Composition of dominant species at each site in Hangzhou Bay

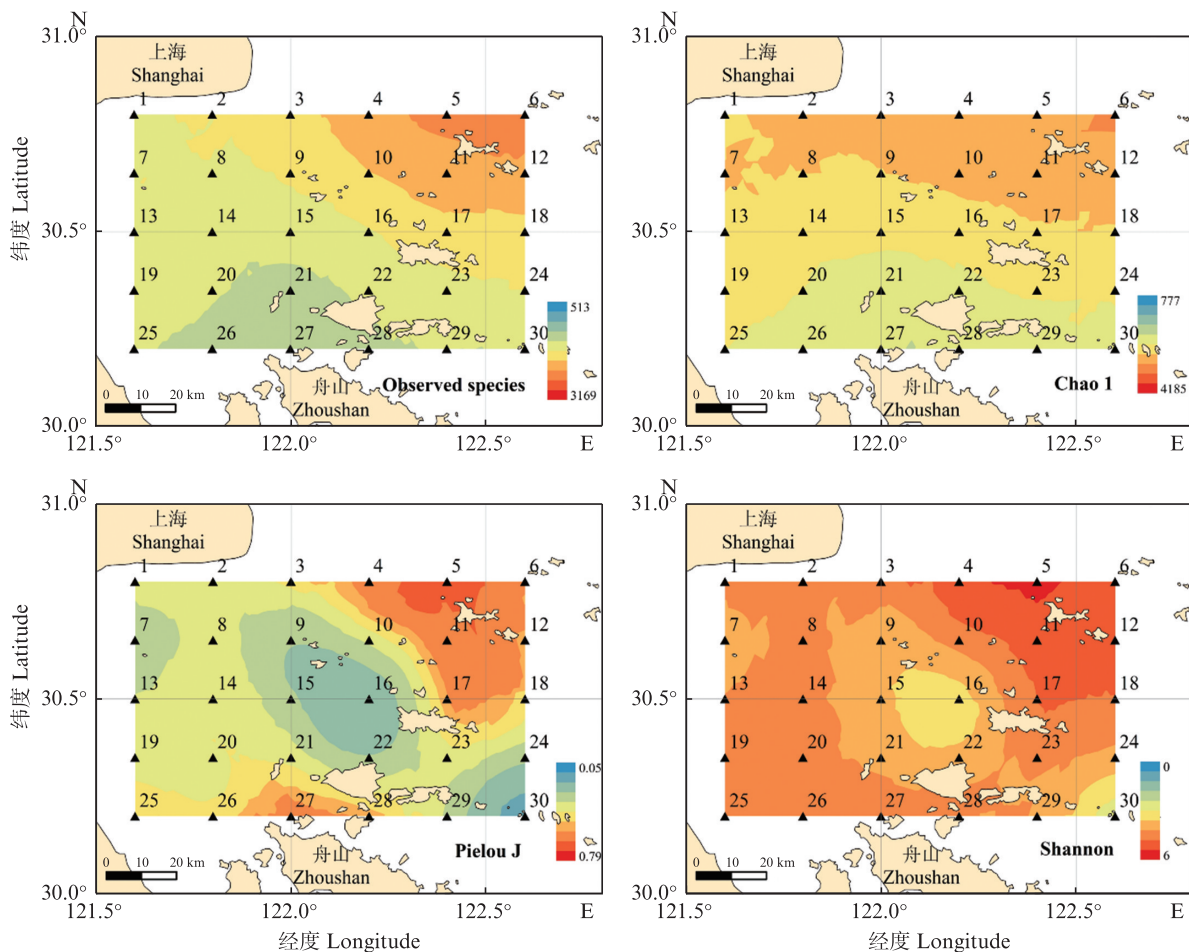


图 3 杭州湾表层沉积物中生物丰富度指数、均匀度指数和多样性指数的空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of biotic richness index (Observed species, Chao1), evenness index (Pielou J) and diversity index (Shannon) in the surface sediments of Hangzhou Bay

较高,说明物种分布更均匀,群落结构更稳定;中部区域数值低,区域物种分布不均,单一物种占主导,如点位 16、9 和 15,是物种三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)相对丰富度前三的点位,分别是 84.55%、69.59% 和 29.64%。

多样性指数 Shannon 为 0.31~6.01,其综合考虑了物种丰富度和均匀度。采样区域东北部靠近长江口区域数值较高,表明其生物多样性高,可能由于长江径流及营养物质输入等因素支持了更多的物种共存,生物群落更为复杂和稳定,中心区域 Shannon 数值较低,表明生物多样性较低,可能由于生境条件与地理环境压力共同驱动所致。一方面,中心区域东侧舟山群岛与岱山岛呈链状分布,形成半封闭地形,阻碍长江冲淡水与外海高盐水体的交换^[14-16]。这种地理阻隔导致中部区域水动力减弱,细颗粒黏粒持续悬浮并随潮汐外输,而粗颗粒(砂粒-粉粒)因重力沉降在岛群背风侧堆积(图 4)。粗质底栖环境虽利于蟹类掘穴,但缺乏黏粒-有机质复合体,抑制了依赖微孔隙生境的端足类、多毛类等小型底栖动物的生存^[17-18]。岛屿间狭窄水道形成生物扩散屏障。浮游幼虫(如贝类、棘皮动物)难以跨越岛链进入中部区域,导致群落补充依赖本地繁殖^[19]。长江口外海域的物种丰富度指数均值为 0.64 ± 0.14 ,而中部区域(南支水域)的丰富度指数更低,可能接近或低于 1% 的阈值^[20-21]。另一方面,中心区域三疣梭子蟹等优势种通过生物扰动改变底质氧化还原状态,蟹类摄食选择性(偏好多毛类与小型甲壳类)进一步降低物种均匀度,形成“正反馈循环”——优势种通过改变环境巩固其生态位,加剧物种和群落单一化。

2.2 生境要素的分布及其与生物多样性的关系

本研究生境要素从粒度组成和 TOC、TN 展开讨论。杭州湾沉积物粒度呈现显著空间异质性(图 4),整体以粉粒为主导组分($70.72\% \pm 1.94\%$),黏粒含量普遍低于 31.52%。值得注意的是,位于钱塘江水平径流口的中心区(9、15 点位)黏粒含量最低(<15%),这与该区域强潮汐动力和径流冲刷作用密切相关。高能水动力环境通过选择性输运机制抑制细颗粒沉积,同时促进粗颗粒在近物源区或高扰动带的富集^[22]。此外,周边岛屿群对水流的阻挡与分流效应可能进一步

强化了沉积物分选的空间梯度,例如舟山群岛的岬角地形可能形成局部涡流,导致粗颗粒物质在背风侧堆积^[23]。

沉积物粒度组成与多样性指数(图 3)呈现协同分布格局:黏粒含量最低的中心区同时表现为低多样性(Shannon 较低),这与优势种蟹类(如三疣梭子蟹)的栖息偏好高度吻合。研究表明,粗颗粒底质(粉砂-砂粒混合相)可为蟹类提供更稳定的掘穴环境。类似现象在长江口北支有报道,ZHAO 等^[24]发现粗砂质区域甲壳类丰富度较黏粒区更高。然而,与南海红树林湿地相比,杭州湾蟹类对粒度敏感度更高,可能反映了两地沉积物有机质含量与水文稳定性的差异——红树林区高有机质黏粒可补偿物理结构的不足,而杭州湾高扰动环境迫使生物更依赖底质物理特性^[25-26]。

杭州湾沉积物中 TOC、TN 的分布受多重输入途径控制,包括陆源输入(地表径流、大气沉降)、海洋内源生产(生物碎屑沉降)及早期成岩作用释放^[27-28]。本研究显示,表层沉积物 TOC 含量为 $(0.20 \pm 0.06)\%$ ($0.09\% \sim 0.31\%$),TN 为 $(0.06 \pm 0.01)\%$ ($0.04\% \sim 0.11\%$)。北部 TOC 高值区(>0.25%)与长江口羽状流扩散范围高度重叠(图 3),印证了长江对边缘海有机碳库的支配性贡献^[29-30]。这一现象与密西西比河口沉积物 TOC 分布模式相似,但杭州湾因潮汐搅拌更强,陆源有机质保存效率较后者低约 30%^[28, 31-32]。此外,若干年前的舟山海域水质“极差”(《中国近岸海域环境质量公报》)进一步暗示港口活动(如船舶油污、养殖废水)可能通过细颗粒吸附作用增加沉积物中难降解烃类有机质的累积^[28, 33]。

TOC/TN(C/N)值可以反映区域有机物的来源组成^[34]。研究区 C/N 值(3.1 ± 0.8 , $1.6 \sim 4.5$)指示有机质以海源为主,北部近长江口区域比值最高,与长江大量陆源有机质输入(年均输沙量 $4.27 \times 10^8 \text{ t}$)^[35]及高浮游生物生产力(*Chl.a* 峰值 > $10 \mu\text{g/L}$)密切相关^[36],与北部高浮游生物生产力及富营养化状态($\text{TN} > 0.07\%$)相符;而东南部岛屿区(如舟山北部)C/N 值较低(2.7 ± 0.8),可能因为细菌源有机质主导或黏粒矿物对 NH_4^+ 的强烈吸附;对应多样性较低(Shannon < 3),可能因有机质难降解(如细菌细胞壁残留物),迫使微生物群

落向寡营养型(如放线菌门)演替,降低功能多样性^[37]。此趋势与珠江口研究结果相悖,后者因陆

源腐殖质输入导致 C/N 值与多样性呈负相关^[38-39],凸显区域特异性机制的重要性。

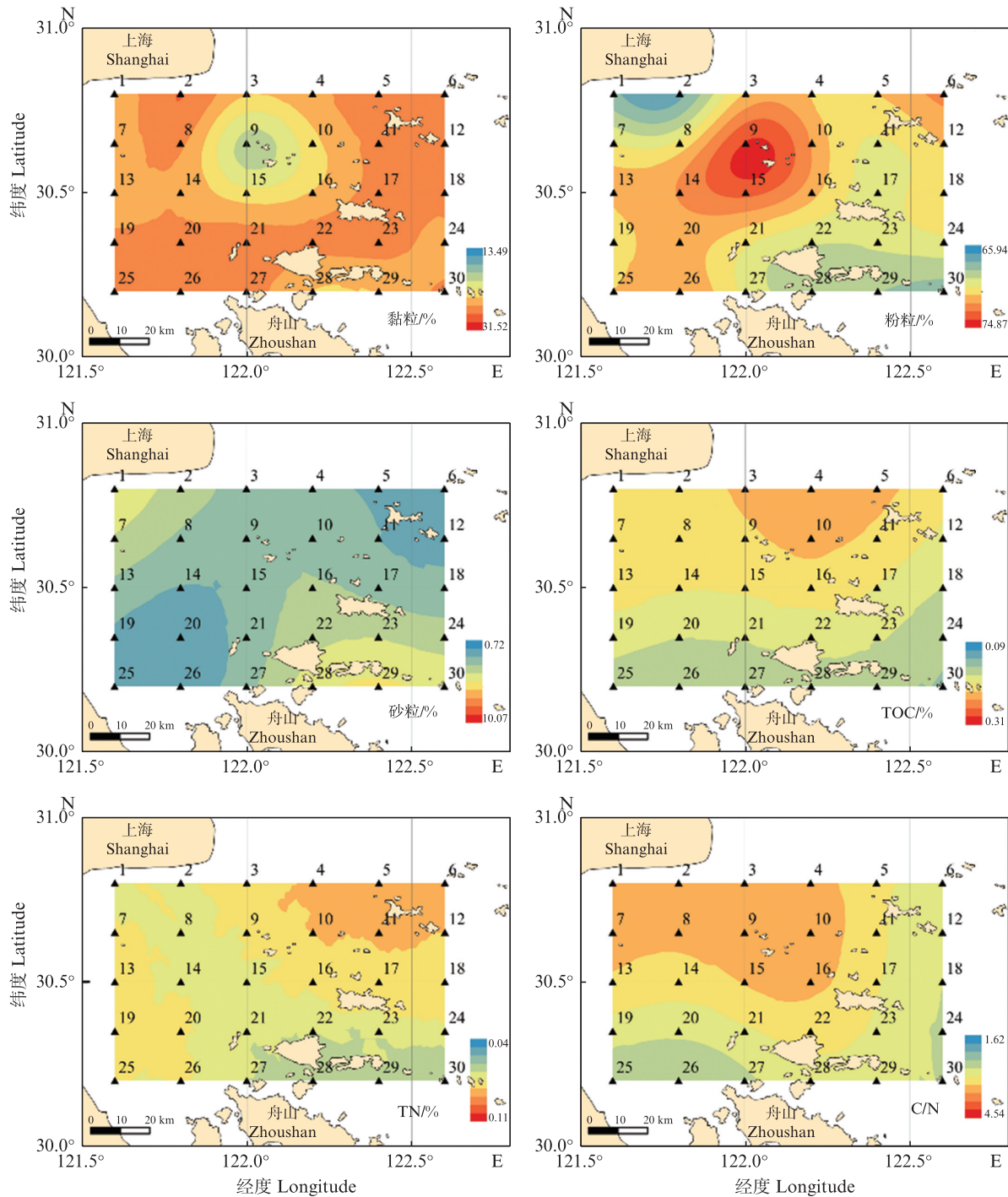


图4 杭州湾表层沉积物中粒度、TOC、TN、C/N值的分布

Fig. 4 Distribution of particle size, TOC, TN and C/N ratio in surface sediments of Hangzhou Bay

2.3 污染物分布及其与生物多样性的关系

杭州湾表层沉积物有机氯农药中 DDTs 含量为 9.45 ± 1.68 (6.58~12.26) ng/g, HCHs 含量为 0.26 ± 0.22 (0~1.17) ng/g, 其空间分布呈现显著陆

源输入特征(图5)。钱塘江口、甬江口及舟山-岱山岛群邻近海域有机氯农药含量最高,与该区域历史上集约化农业(水稻、棉田)的农药残留物经地表径流输入密切相关^[40-42]。此外,岛群邻近海

域中船舶防污涂料的使用和释放,可能贡献了部分“新鲜”的DDTs(如 *o,p'*-DDT)^[43]。相比之下,开阔海域有机氯农药含量因离岸水动力稀释与沉积物再悬浮作用显著降低^[40, 44],这一分布模式与长江口及珠江口沉积物有机氯农药的“近岸富集-离岸扩散”规律一致,但杭州湾因潮汐湍流更强,离岸衰减速率较二者高约20%^[45]。

杭州湾表层沉积物中溴代阻燃剂含量为 11.79 ± 12.69 ng/g (0.70~44.11 ng/g),高值区集中于钱塘江口、甬江口及舟山港周边(图5),与周边电子垃圾拆解场、塑料制品加工区的分布有关^[46]。其中传统溴代阻燃剂PBDEs占比23.3%[(2.75 ± 2.67) ng/g],新型溴代阻燃剂NBFRs占比76.7%[(9.04 ± 10.64) ng/g]。NBFRs比重较大(如DBDPE、BTBPE)与2004年以来中国逐步禁用五溴、八溴和十溴联苯醚(BDE-209)的政策密切相关^[47]。然而,BDE-209仍占PBDEs总量的71%,反映电子制造业对十溴联苯醚的持续需求,这一趋势与珠江口沉积物中PBDEs占比(38%)形成鲜明对比,凸显长三角地区电子产业链对传统溴代阻燃剂的深度依赖^[48]。PBDEs的“陆源热点”特征与有机氯农药相似,但其在河口区的滞留能力较弱($\log K_{ow}=6.5 \sim 8.2$),更易通过颗粒物吸附-解吸循环向开阔海域迁移。杭州湾NBFRs含量(均值9.04 ng/g)显著高于渤海湾,但低于珠江口,可能与区域产业升级节奏差异有关^[49-50]。此外,NBFRs的“陆-海递减”梯度较PBDEs更平缓,NBFRs因疏水性较低($\log K_{ow}=4.1 \sim 5.8$),其更高的水溶性,离岸扩散能力更强(图5)。这与实验室模拟中NBFRs在沉积物-水分配系数(Kd)较PBDEs低1~2个数量级的结果一致^[51]。

杭州湾表层沉积物中全氟及多氟烷基物质总含量为 2.40 ± 1.79 ng/g (0.20~6.63 ng/g),较珠江口低约60%^[52-53],可能与杭州湾因强潮汐动力(潮差>4 m)与长江径流稀释作用有关。其中PFCA(2.11 ± 1.69 ng/g)占比87.9%,远高于PFSA(0.02±0.03 ng/g)及Emerging PFAS(0.28 ± 0.70 ng/g),这一组成特征与莱州湾(PFCA占比50%~97%)相似^[54]。总体上全氟及多氟烷基物质在沉积物中的空间分布没有明显的“陆源输入-离岸扩散”特征(图5),这与其具有强极性($\log K_{ow}=2.1 \sim 4.0$)和强水溶性(>500 mg/L)密切相关^[55],导致其优先赋存于水相,仅少量通过颗粒物吸附进入沉积

物。因此,沉积物-水界面的垂向异质性可能显著影响污染物赋存形态与生物迁移。钱塘江口附近传统PFCA+PFSA含量较高(>5 ng/g),与宁波石化园区含氟聚合物生产废水排放直接相关^[56];Emerging PFAS(如GenX)虽检出量较低(0.27 ng/g),但其高水溶性与抗降解性($t_{1/2} > 1\,000$ d)导致其迁移距离较远,在海湾东部较高,受黑潮分支影响,通过水团平流与细颗粒物(黏粒)结合向东海陆架输运^[57-58],这一现象在其他区域沉积物中尚未见报道,凸显长三角工业替代品的环境风险。

2.4 生境要素、污染物与生物群落、多样性的综合分析

单独分析沉积环境中粒度组成、TOC和TN的分布为理解生物栖息分布提供依据;污染物与生物群落、多样性的相关性分析,可定性污染物对生物的潜在抑制,为识别关键污染因子、评估生态风险等级提供数据支撑。然而,沉积环境是同时包含许多要素的,多个环境因子之间发生相互作用从而对生物产生综合影响。因此,有必要综合分析生境要素-污染物与生物多样性关系(图6a),强化对该区域生态系统状况的指示作用;以及聚焦到生物类群(图6b),深入探讨生境要素和污染物对不同生物群落的影响机制。

冗余分析(RDA)揭示杭州湾沉积生境要素-污染物对生物多样性的梯度驱动特征(图6a)。在多样性层面($RDA1=54.87\%$, $RDA2=16.36\%$),Chao1、Observed species、Shannon和Pielou J这几类指数箭头紧密聚集,表明这些指标在衡量生物多样性时具有较高的一致性,它们所反映的生物多样性变化趋势较为相似,主要受到TOC和TN的控制。丰富度Chao1、Observed species与TOC、TN显著正相关($\theta < 20^\circ$),与粉砂正相关($\theta < 45^\circ$),印证了“有机质-粒度耦合假说”:粉砂通过优化孔隙结构促进有机质-微生物互作,支持多样化代谢功能群共存。Observed species、Pielou J和Shannon受TN驱动作用大,但对TOC和粒度的敏感性降低,这一机制在密西西比河三角洲表现为粉砂占比>65%时Shannon提升40%^[59],但杭州湾因强潮汐扰动导致“粉砂-TOC”耦合效率较前者低约25%^[60]。PFCA与多样性指数(Shannon)呈强负相关($\theta \approx 180^\circ$),其抑制作用强度高,可能与长三角工业区排放的短链PFAS占

比高(>60%)有关^[61],因其更易穿透生物膜屏障。DDTs 的负效应也较强,尽管已经禁用多年,DDTs 残留仍对生物多样性有负面影响。相较于

全氟及多氟烷基物质和有机氯农药,溴代阻燃剂的抑制丰富度的强度较弱,可能反映PBDEs 及其替代物NBFRs的延迟毒性效应。

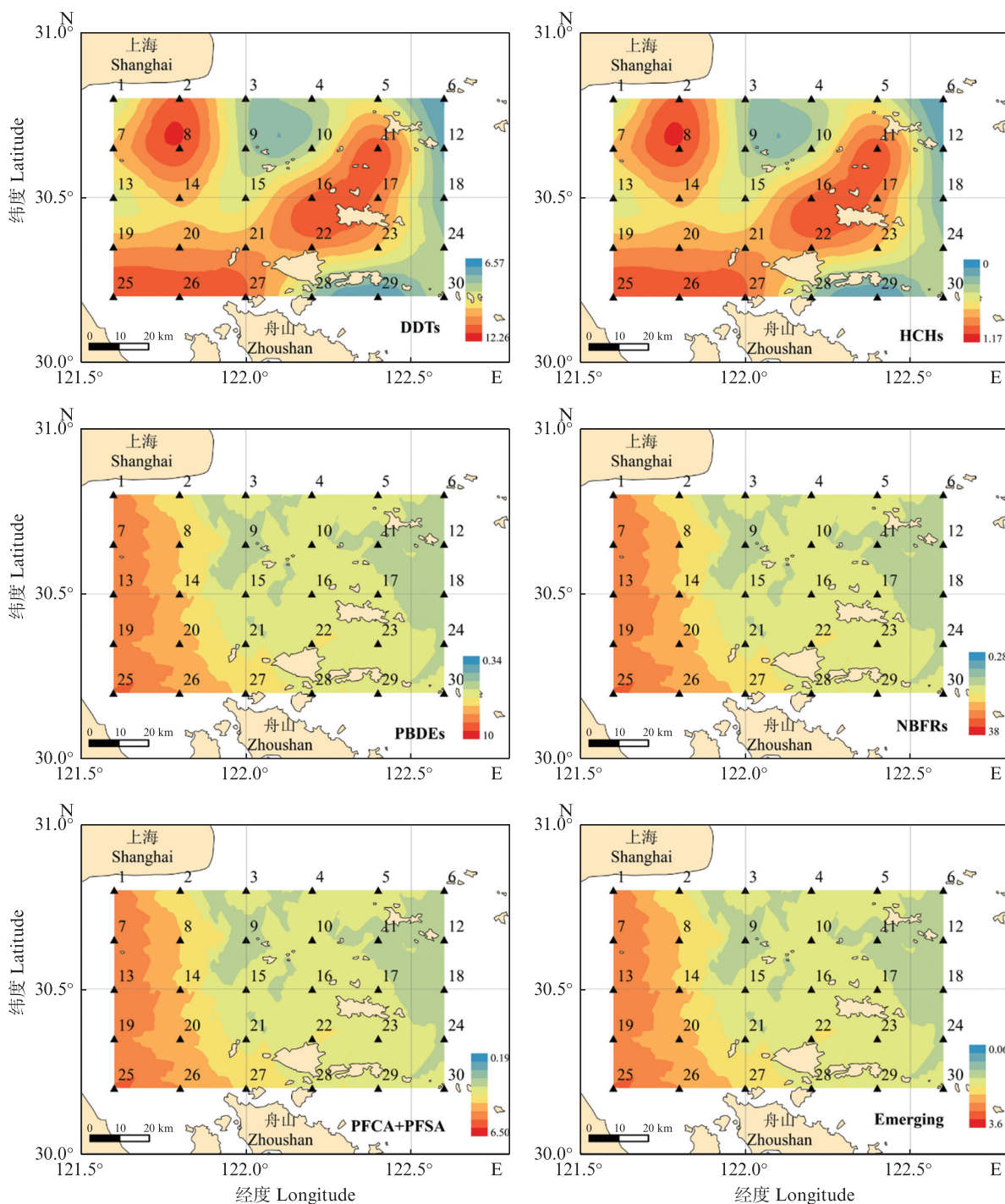


图5 杭州湾表层沉积物中污染物的空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution of pollutants in surface sediments of Hangzhou Bay

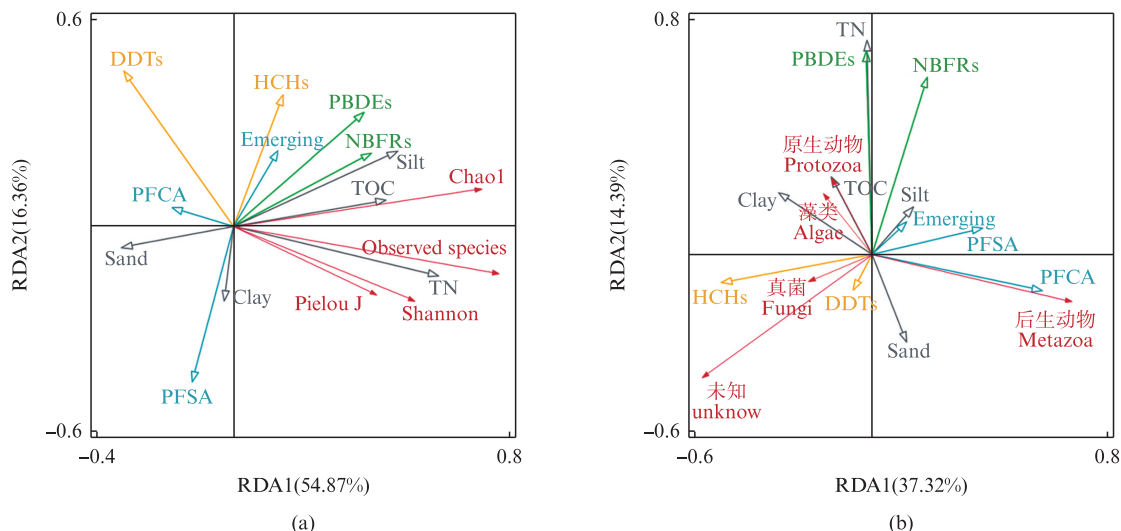


图6 杭州湾表层沉积物生境要素-污染物与生物多样性、群落的关系

Fig. 6 Relationships between habitat elements-pollutants and biodiversity and communities in the surface sediments of Hangzhou Bay

在生物群落层面 (RDA1=37.32%, RDA2=14.39%), 原生动物与藻类主要受 TOC、TN 和黏粒的正向驱动 (夹角 $0 < 30^\circ$), 这与长江口研究结果一致, 黏粒通过吸附溶解态有机质形成微团聚体, 为微型生物提供高比表面积的附着基面^[62]。然而, PFCA、PFSA 与这两类生物呈显著负相关 ($0 \sim 150^\circ$), 可能源于其表面活性剂特性破坏细胞膜脂质双层结构, 而藻类对这两组化合物的强富集能力 (BAF>5 000) 进一步放大其亚致死效应^[63]。相比较, Emerging PFAS 因环境暴露时间短且藻类可利用性低 ($\log K_{ow}=2.1 \sim 3.8$), 尚未表现出显著抑制^[64]。后生动物 (如三疣梭子蟹、中华绒螯蟹等占比 >26%) 分布与砂粒含量密切相关 ($0 \sim 40^\circ$), 其掘穴行为依赖粗颗粒沉积物的机械稳定性, 这一适应性特征与切萨皮克湾底栖蟹类 (*Callinectes sapidus*) 的栖息偏好高度相似^[65]。杭州湾蟹类对 PFCA 的敏感性较弱, 因为 PFCA 具有高水溶性和低疏水性, 暴露于沉积物中的剂量可能相对较低, 而蟹类通过摄食底栖生物或长期接触沉积物, 导致 PFCA 在蟹类组织中的累积量可能低于脂溶性更强的传统污染物。真菌则与 DDTs、HCHs 呈现正相关 ($0 \sim 30^\circ$), 可能是其通过细胞壁黑色素吸附有机氯农药并启动胞外降解途径, 这一耐受机制在波罗的海沉积物真菌中曾有报道^[66]。

基于杭州湾沉积物中生物群落与多样性的冗余分析 (RDA) 结果, 构建了多维度生态响应评

估框架, 为区域生态管理提供了宏观尺度的诊断工具。而聚焦微生物作用机制的 RDA 模型, 通过解耦生境要素与污染物对特定功能群的差异化选择压力, 揭示了底栖生物适应性策略的分子生态学基础。宏观指标揭示生态系统的涌现性特征, 而微观机制则阐明其内在动力学约束, 这种“宏观格局-微观机制”的辩证互证, 不仅验证了多尺度生态模型的解释力^[67], 更凸显跨层次分析在解析复杂生境胁迫中的必要性。

3 结论

明确环境因子与生物指标的关联性, 可锁定生态保护的核心影响因素。本研究发现: (1) 关键种主导的生态级联效应: 三疣梭子蟹通过生物扰动-底质反馈循环加剧中心区生物同质化, 长江径流与潮汐动力塑造了北部高多样性; (2) 沉积物粒度 (粉粒主导) 与 C/N 值 (海源有机质为主) 的协同分布调控生物栖息模式; (3) 污染物空间格局受陆源输入、沉积粒度和水动力扩散共同控制; (4) 宏观尺度的冗余分析 (RDA) 构建了杭州湾多维度生物群落与多样性的响应评估框架, 而微观机制解析揭示了环境因子与污染物对生物功能群落的差异化选择压力, 二者通过“格局-机制”互证验证了多尺度生物群落与多样性的解释力, 凸显跨层次分析对揭示生态系统涌现性特征与内在动力学约束的必要性。

杭州湾作为强潮河口生态系统的典型区域,

本研究的相关性分析结果可积累区域生态数据,深化对河口沉积物-生物交互作用的认知,在舟山群岛生态廊道恢复中强化底质异质性修复。本研究凸显了多因子协同作用对河口生态系统的级联效应,为海岸带综合管理提供了跨尺度理论支撑,推动区域生态保护理论与实践发展。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] BORJA Á, DAUER D M, ELLIOTT M, et al. Medium- and long-term recovery of estuarine and coastal ecosystems: patterns, rates and restoration effectiveness [J]. *Estuaries and Coasts*, 2010, 33(6): 1249-1260.
- [2] LEVIN L A, BOESCH D F, COVICH A, et al. The function of marine critical transition zones and the importance of sediment biodiversity [J]. *Ecosystems*, 2001, 4(5): 430-451.
- [3] VÖRÖSMARTY C J, MCINTYRE P B, GESSNER M O, et al. Global threats to human water security and river biodiversity [J]. *Nature*, 2010, 467(7315): 555-561.
- [4] HUANG P S, HENNIG K, KALA J, et al. Climate change overtakes coastal engineering as the dominant driver of hydrological change in a large shallow lagoon [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, 24(11): 5673-5697.
- [5] 杜家笔, 裴艳东, 高建华, 等. 弱动力浅海中的悬沙输运机制: 以天津港附近海域为例 [J]. *海洋学报*, 2012, 34(1): 136-44.
DU J B, PEI Y D, GAO J H, et al. The suspended sediment transport associated with low flow patterns in shallow waters: a case study from the Tianjin subtidal area [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(1): 136-144.
- [6] 李淮, 吴玮, 田永静, 等. 苏州市老城区降雨径流颗粒物粒径分布及污染物赋存形态 [J]. *环境科学*, 2016, 37(2): 565-572.
LI H, WU W, TIAN Y J, et al. Particle size distribution and pollutant speciation analyses of stormwater runoff in the ancient town of Suzhou [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(2): 565-572.
- [7] DULLER R A, WHITTAKER A C, FEDELE J J, et al. From grain size to tectonics [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2010, 115: F03022.
- [8] 潘存鸿, 曾剑, 唐子文, 等. 钱塘江河口泥沙特性及河床冲淤研究 [J]. *水利水运工程学报*, 2013(1): 1-7.
PAN C H, ZENG J, TANG Z W, et al. A study of sediment characteristics and riverbed erosion/deposition in Qiantang estuary [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2013(1): 1-7.
- [9] 陈莉, 陈琳琳, 董志远, 等. 黄河三角洲典型潮沟系统水文连通性对大型底栖动物群落结构的影响 [J]. *生态学报*, 2023, 43(22): 9232-9246.
CHEN L, CHEN L L, DONG Z Y, et al. Influence of hydrological connectivity of typical tidal creek system on macrobenthos community structure in the Yellow River Delta [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(22): 9232-9246.
- [10] 范启清, 桑文华, 卫新, 等. 杭州湾滨海平原农区农业发展空间布局规划研究 [J]. *浙江学刊*, 1989(5): 25-29.
FAN Q Q, SANG W H, WEI X, et al. Research on the spatial layout planning of agricultural development in the coastal plain agricultural area of Hangzhou bay [J]. *Zhejiang Academic Journal*, 1989(5): 25-29.
- [11] 林泳峰, 阮挺, 江桂斌. 发现新型化学污染物的技术途径 [J]. *中国科学: 化学*, 2018, 48(10): 1151-1162.
LIN Y F, RUAN T, JIANG G B. Analytical strategies on identification of novel chemical pollutants [J]. *Scientia Sinica Chimica*, 2018, 48(10): 1151-1162.
- [12] 李晨虹, 凌岚馨, 谭娟, 等. 环境DNA技术在水生生物监测中的挑战、突破和发展前景 [J]. *上海海洋大学学报*, 2023, 32(3): 564-574.
LI C H, LING L X, TAN J, et al. Challenge, breakthrough and future perspectives of environmental DNA technology in monitoring aquatic organisms [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2023, 32(3): 564-574.
- [13] 杨立新, 王静涵. 环境污染物复合暴露毒性和健康风险评估方法研究进展 [J]. *环境科学研究*, 2025, 38(2): 419-427.
YANG L X, WANG J H. Advances in toxic effects and health risk assessment of combined exposure to multiple pollutants [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2025, 38(2): 419-427.
- [14] 胡吉连, 杜晓琴. 舟山海域悬浮体的特征及输运机制 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(6): 39-48.
HU J L, DU X Q. Characteristics and transport mechanism of suspended particles in offshore area of Zhoushan Islands [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(6): 39-48.
- [15] 尹艳娥, 沈盎绿, 周进, 等. 春夏季长江口及其邻近海域表层和底层环境因素、氮分布分析 [J]. *生态环境学报*, 2016, 25(2): 272-278.
YIN Y E, SHEN A L, ZHOU J, et al. Analysis on the environmental factors and dissolved inorganic nitrogen in the Changjiang (Yangtze River) estuary and in the adjacent east China sea in spring and summer [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(2): 272-278.
- [16] 宋晨, 许丽婷, 王晓波, 等. 浙江舟山海域大型底栖动物群落组成及主要影响因子分析 [J]. *海洋与湖沼*,

- 2022, 53(6): 1585-1597.
- SONG C, XU L T, WANG X B, et al. Composition and main environmental factors of macrobenthos community in sea area of Zhoushan islands, Zhejiang [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2022, 53(6): 1585-1597.
- [17] 蔡永久, 姜加虎, 张路, 等. 长江中下游湖泊大型底栖动物群落结构及多样性[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(6): 811-819.
- CAI Y J, JIANG J H, ZHANG L, et al. Community structure and biodiversity of macrozoobenthos of typical lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(6): 811-819.
- [18] 陈丙温, 蔡立哲, 饶义勇, 等. 底质细化对厦门潮下带文昌鱼栖息地大型底栖动物群落的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(3): 494-505.
- CHEN B W, CAI L Z, RAO Y Y, et al. Effects of sediment fining on benthic macrofaunal community in subtidal amphioxus habitats in Xiamen [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(3): 494-505.
- [19] TREML E A, ROBERTS J, HALPIN P N, et al. The emergent geography of biophysical dispersal barriers across the Indo-West Pacific [J]. *Diversity and Distributions*, 2015, 21(4): 465-476.
- [20] 杨颖, 谭赛章, 陈思思, 等. 2011—2020年长江口大型底栖动物群落结构变化趋势[J]. *生态学报*, 2023, 43(14): 5863-5874.
- YANG Y, TAN S Z, CHEN S S, et al. The variation of macrobenthos community structure in Changjiang River estuary from 2011 to 2020 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(14): 5863-5874.
- [21] 谭皓月, 曹慧群, 卢士强, 等. 长江口2022年水动力及营养盐时空分布规律模拟研究[J]. *环境科学研究*, 2025, 38(2): 272-281.
- TAN H Y, CAO H Q, LU S Q, et al. Numerical modelling of spatiotemporal evolution of hydrodynamics and nutrients in the Yangtze Estuary in 2022 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2025, 38(2): 272-281.
- [22] 刘洪树, 姜玉池, 张冰. 莱州湾东部滨海砂金成矿远景初步分析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1991, 11(2): 17-24.
- LIU H S, JIANG Y C, ZHANG B. Potentiality of littoral placer gold mineral resources in the east of the Laizhou bay [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1991, 11(2): 17-24.
- [23] 陈俊锦, 张经纬, 刘时桥, 等. 南海中沙群岛海域表层沉积物粒度特征及其输运趋势[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2022, 42(2): 15-27.
- CHEN J J, ZHANG J W, LIU S Q, et al. Grain size distribution pattern of surface sediments and its implications for transportation trend: A case from the waters off Zhongsha Islands, the South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(2): 15-27.
- [24] 赵蓬蓬, 高春霞, 陈锦辉, 等. 长江口北支水域甲壳类群落结构特征[J]. *水产科学*, 2020, 39(4): 491-499.
- ZHAO P P, GAO C X, CHEN J H, et al. Community structure characteristics of crustaceans in north branch of Yangtze River estuary [J]. *Fisheries Science*, 2020, 39(4): 491-499.
- [25] 张玥, 李玉凤, 贾悦, 等. 滨海湿地蟹类分布特征及其生境影响因子分析——以江苏省条子泥为例[J]. *海洋与湖沼*, 2023, 54(5): 1383-1394.
- ZHANG Y, LI Y F, JIA Y, et al. Impact factors on distribution and habitat of crab in coastal wetland in Tiaozini, Jiangsu, China [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2023, 54(5): 1383-1394.
- [26] 赵小雨, 蔡立哲, 饶义勇, 等. 考洲洋人工种植红树林湿地大型底栖动物群落环境响应[J]. *生态学报*, 2023, 43(13): 5505-5516.
- ZHAO X Y, CAI L Z, RAO Y Y, et al. Environmental response of macrofaunal community in planted mangrove wetlands in Kaozhou Bay, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(13): 5505-5516.
- [27] XU F L, JI Z Q, WANG K, et al. The distribution of sedimentary organic matter and implication of its transfer from Changjiang Estuary to Hangzhou Bay, China [J]. *Open Journal of Marine Science*, 2016, 6(1): 103-114.
- [28] 段晓勇, 印萍, 刘金庆, 等. 中国东部近海现代沉积环境[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(2): 14-20.
- DUAN X Y, YIN P, LIU J Q, et al. Modern sedimentation environments in the coastal zone of East China [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(2): 14-20.
- [29] 吕艳美, 葛晨东, 高抒, 等. 长江口水下三角洲表层沉积物有机质分布特征[J]. *第四纪研究*, 2012, 32(6): 1132-1139.
- LYU Y M, GE C D, GAO S, et al. Distribution patterns of organic matter in the surficial sediment over the Changjiang Subaqueous delta [J]. *Quaternary Sciences*, 2012, 32(6): 1132-1139.
- [30] 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, LYU 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.
- [31] SMITH M, BENTLEY S J. Sediment capture in flood plains of the Mississippi River: A case study in Cat Island National Wildlife Refuge, Louisiana [J]. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2015, 367: 442-446.

- [32] 张慧芳, 吴欣松, 王斌, 等. 陆相湖盆沉积有机质富集机理研究进展[J]. 沉积学报, 2016, 34(3): 463-477.
ZHANG H F, WU X S, WANG B, et al. Research progress of the enrichment mechanism of sedimentary organics in lacustrine basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(3): 463-477.
- [33] 石学法, 胡利民, 乔淑卿, 等. 中国东部陆架海沉积有机碳研究进展: 来源、输运与埋藏[J]. 海洋科学进展, 2016, 34(3): 313-327.
SHI X F, HU L M, QIAO S Q, et al. Progress in research of sedimentary organic carbon in the East China Sea: sources, dispersal and sequestration [J]. *Advances in Marine Science*, 2016, 34(3): 313-327.
- [34] MEYERS P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter [J]. *Chemical Geology*, 1994, 114(3/4): 289-302.
- [35] 左书华, 杨春松, 付桂, 等. 长江口入海水沙通量变化及其影响分析[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(11): 56-64.
ZUO S H, YANG C S, FU G, et al. Variation of water and sediment flux and its influence on the Yangtze River Estuary [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2022, 38(11): 56-64.
- [36] 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.
- [37] 邵鹏帅, 解宏图, 鲍雪莲, 等. 森林次生演替和土壤层次对微生物群落结构的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(5): 1455-1463.
SHAO P S, XIE H T, BAO X L, et al. Effects of forest secondary succession and soil depth on microbial community structure [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(5): 1455-1463.
- [38] 徐阳, 李朋辉, 张传伦, 等. 珠江口沉积物溶解性有机质来源及光谱特征的空间变化[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(1): 63-72.
XU Y, LI P H, ZHANG C L, et al. Spectral characteristics of dissolved organic matter in sediment pore water from Pearl River Estuary [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2021, 51(1): 63-72.
- [39] 施玉珍, 陈树鸿, 赵辉, 等. 珠江口海域沉积物-水界面营养盐释放特征研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2020, 39(3): 517-524.
SHI Y Z, CHEN S H, ZHAO H, et al. Release characteristics of nutrients at the sediment-water interface of the Pearl River Estuary [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2020, 39(3): 517-524.
- [40] 邢云青, 尹方, 黄宏, 等. 长江口及东海近岸表层沉积物中有机氯农药赋存特征[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(1): 52-56.
XING Y Q, YIN F, HUANG H, et al. Residual of organochlorine pesticides in sediments from Changjiang Estuary and nearshore of the East China Sea [J]. *Marine Environmental Science*, 2011, 30(1): 52-56.
- [41] 唐访良, 张明, 徐建芬, 等. 钱塘江(杭州段)水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2015, 35(11): 3595-603.
TANG F L, ZHANG M, XU J F, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of organochlorine pesticides (OCPs) in Qiantang River, Hangzhou Section [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(11): 3595-3603.
- [42] 王佳旻, 徐良, 王珂, 等. 花鸟岛贻贝养殖区六氯环己烷、双对氯苯基三氯乙烷和多氯联苯的赋存及健康风险评估[J]. 上海海洋大学学报, 2024, 33(3): 658-669.
WANG J M, XU L, WANG K, et al. Occurrence and health risk assessment of HCHs, DDTs and PCBs in the mussel mariculture area of Huaniao Island [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2024, 33(3): 658-669.
- [43] LIN T, HU Z H, ZHANG G, et al. Levels and mass burden of DDTs in sediments from fishing harbors: the importance of DDT-containing antifouling paint to the coastal environment of China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(21): 8033-8038.
- [44] 罗孝俊, 陈社军, 麦碧娴, 等. 珠江三角洲河流及南海近海区域表层沉积物中有机氯农药含量及分布[J]. 环境科学学报, 2005, 25(9): 1272-1279.
LUO X J, CHEN S J, MAI B X, et al. Distribution of organochlorine pesticides (OCPs) in surface sediments in Pearl River Delta and its adjacent coastal areas of South China Sea [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(9): 1272-1279.
- [45] 胡成飞, 潘存鸿, 吴修广, 等. 1959—2019年杭州湾南岸滩涂演变规律及机制[J]. 水科学进展, 2021, 32(2): 230-241.
HU C F, PAN C H, WU X G, et al. Tidal flat evolution law and its mechanism on the south bank of Hangzhou Bay from 1959 to 2019 [J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(2): 230-241.
- [46] LING S Y, ZHOU S Q, TAN J Q, et al. Brominated flame retardants (BFRs) in sediment from a typical e-waste dismantling region in Southern China: Occurrence, spatial distribution, composition profiles, and ecological risks [J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 824: 153813.
- [47] SHARKEY M, HARRAD S, ABDALLAH M A E, et al. Phasing-out of legacy brominated flame retardants: The UNEP Stockholm Convention and other legislative action worldwide [J]. *Environment International*, 2020, 144: 106041.

- [48] 竺春年, 王儒威, 夏潇潇, 等. 巢湖表层沉积物中多溴联苯醚的分布和污染源解析[J]. 湖泊科学, 2018, 30(1): 150-156.
- DA C N, WANG R W, XIA X X, et al. Distribution and sources of polybrominated diphenyl ethers in surface sediments of Lake Chaohu[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(1): 150-156.
- [49] 解伟峰, 李家科, 李莹, 等. 黄河流域水体沉积物中新兴污染物研究进展[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(1): 227-236.
- XIE W F, LI J K, LI Y, et al. Research progress of emerging pollutants in sediments of the Yellow River Basin[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 45(1): 227-236.
- [50] 黄晨晨, 曾艳红, 管克兰, 等. 黑臭水体沉积物中新型溴代阻燃剂的污染特征[J]. 中国环境科学, 2024, 44(7): 3945-3954.
- HUANG C C, ZENG Y H, GUAN K L, et al. Occurrence, spatial distribution, and risk assessment of novel brominated flame retardants in sediments from black-odorous rivers[J]. China Environmental Science, 2024, 44(7): 3945-3954.
- [51] XIONG P, YAN X T, ZHU Q Q, et al. A review of environmental occurrence, fate, and toxicity of novel brominated flame retardants[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(23): 13551-13569.
- [52] CHEN L G, TSUI M M P, LAM J C W, et al. Contamination by perfluoroalkyl substances and microbial community structure in Pearl River Delta sediments[J]. Environmental Pollution, 2019, 245: 218-225.
- [53] 王晨羽, 潘奕陶, 戴家银. 物种敏感度分布法推导全氟辛酸和全氟辛烷磺酸水质生态风险阈值[J]. 海洋环境科学, 2024, 43(6): 945-953, 962.
- WANG C Y, PAN Y T, DAI J Y. Ecological toxicity thresholds of perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonate for water quality derived by species sensitivity distribution[J]. Marine Environmental Science, 2024, 43(6): 945-953, 962.
- [54] ZHAO Z, TANG J H, XIE Z Y, et al. Perfluoroalkyl acids (PFAAs) in riverine and coastal sediments of Laizhou Bay, North China[J]. Science of the Total Environment, 2013, 447: 415-423.
- [55] DUINSLAEGER N, RADJENOVIC J. Electrochemical degradation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) using low-cost graphene sponge electrodes[J]. Water Research, 2022, 213: 118148.
- [56] FANG J H, LI S L, GU T H, et al. Treatment of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A review of transformation technologies and mechanisms[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(1): 111833.
- [57] YAN N, JI Y F, ZHANG B H, et al. Transport of GenX in saturated and unsaturated porous media [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(19): 11876-11885.
- [58] 王越奇, 宋金明, 袁华茂, 等. 西北太平洋黑潮源区沉积特征及黑潮输入对东海沉积物的影响[J]. 海洋科学, 2018, 42(9): 112-126.
- WANG Y Q, SONG J M, YUAN H M, et al. Sedimentary characteristics of the Kuroshio origination area and the influence of the Kuroshio intrusion on sediments of the East China Sea[J]. Marine Sciences, 2018, 42(9): 112-126.
- [59] WU Z Y, LIN W X, LI B L, et al. Terminal restriction fragment length polymorphism analysis of soil bacterial communities under different vegetation types in subtropical area [J]. PLoS One, 2015, 10(6): e0129397.
- [60] 孟凡丽, 卢成原, 王姗姗. 波浪荷载下粉质土动应变和动强度的试验研究[J]. 浙江工业大学学报, 2007, 35(6): 671-674, 686.
- MENG F L, LU C Y, WANG S S. Experimental study on dynamic strain and strength of silt under wave load [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2007, 35(6): 671-674, 686.
- [61] 金梦, 刘丽君, 赵波, 等. 长三角地区水体中全氟化化合物的污染特征及风险评价[J]. 环境化学, 2023, 42(7): 2153-2162.
- JIN M, LIU L J, ZHAO B, et al. Pollution characteristics and risk assessment of perfluoroalkyl substances in surface water from Yangtze River Delta[J]. Environmental Chemistry, 2023, 42(7): 2153-2162.
- [62] 张家春, 刘盈盈, 贺红早, 等. 土壤团聚体与有机碳固定关系研究进展[J]. 福建农业学报, 2016, 31(3): 319-25.
- ZHANG J C, LIU Y Y, HE H Z, et al. Research advances on mechanism of organic carbon sequestration in soil aggregates [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2016, 31(3): 319-325.
- [63] 何强, 颜正, 智悦, 等. 植物对PFAS的富集机制研究进展[J]. 中国环境科学, 2022, 42(11): 5395-5407.
- HE Q, YAN Z, ZHI Y, et al. Research progress on bioaccumulation of per- and polyfluoroalkyl compounds by plants[J]. China Environmental Science, 2022, 42(11): 5395-5407.
- [64] KJØLHOLT J, JENSEN A A, WARMING M. Short-chain polyfluoroalkyl substances (PFAS) [R]. Copenhagen: The Danish Environmental Protection Agency, 2015.
- [65] GÓMEZ LUNA L, SOSA MONTANO A, MORENO CASTILLO I, et al. Biodiversidad, morfometría y alimentación de los cangrejos del género Callinectes

- (Decapoda: Portunidae) en Santiago de Cuba [J].
Revista de Biología Tropical, 2009, 57(3): 671-686.
- [66] ÁLVAREZ-BARRAGÁN J, CRAVO-LAUREAU C, WICK L Y, et al. Fungi in PAH-contaminated marine sediments: Cultivable diversity and tolerance capacity towards PAH[J]. Marine Pollution Bulletin, 2021, 164: 112082.
- [67] PHILLIPS M A, RITALA P. A complex adaptive systems agenda for ecosystem research methodology [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2019, 148: 119739.

Characteristics of biological communities-habitat elements-pollutants distribution and response pattern in Hangzhou Bay sediments

LIU Siru, LIU Xinyi, YUAN Jiawen, MAO Jiali, FENG Meiping, WANG Lifang, LIN Tian

(College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: By the environmental DNA (eDNA) technique and physicochemical parameter analyses, the spatial distribution characteristics of biological community structure, habitat elements and pollutants in the surface sediments of Hangzhou Bay and their impacts on biodiversity were systematically analysed. A total of 53 phyla were identified, with Metazoa dominating (42.55%), notably the key species *Portunus trituberculatus* (20.84%), indicating strong keystone species-driven community assembly. Biodiversity exhibited distinct spatial gradients: species richness indices (Observed species: 513–3 169; Chao1: 777.33–4 185.46) decreased southward, while evenness (Pielou J: 0.05–0.79) and diversity (Shannon: 0.31–6.01) showed a north-high, central-low, and south-moderate pattern. The spatial differentiation of sediment grain size [mainly silt, (70.72±1.94)%] and TOC [(0.20±0.06)%] and TN [(0.06±0.01)%] showed that coarse-grained substrate drove community homogenisation by optimising crab habitat conditions, whereas C/N ratios (3.12±0.83) indicated the dominance of sea-sourced organic matter, and areas of high values of TOC and TN coincided with algal and protozoan dominance coincided. The analysis of contaminants showed that the contaminants in Hangzhou Bay sediments generally showed a decreasing offshore diffusion gradient, of which DDTs [(9.45±1.68) ng/g], brominated flame retardants were dominated by NBFRs (76.7%), BDE209 accounted for more than 71% of the PBDEs, and the PFCs and polyfluoroalkyl substances (PFCAs accounted for 87.9% of the PFCAs) were relatively homogeneously distributed in the sediment due to their high water solubility. The distribution of perfluorinated and polyfluorinated alkyl substances (including 87.9% of PFCAs) is relatively uniform in sediments due to high water solubility. The spatial heterogeneity of habitat elements and pollutants was shaped by tidal dynamics and land-based emissions. By integrating macro-scale redundancy analysis (RDA) and micro-ecological mechanism analysis, a synergistic pattern-mechanism verification system was constructed in Hangzhou Bay. The macro-scale RDA reveals the response of biological community diversity to multi-dimensional environmental gradients, while the micro-scale RDA illustrates the differential driving effects of pollutants and environmental factors on functional communities. The mutual validation of the two systems shows that the cross-scale mutual feedback mechanism is the core pathway to analyse the emergent characteristics of ecosystems, and provides a scientific basis for the multi-stress synergistic management of large-scale strong tidal estuarine ecosystems.

Key words: sediment; biological community; habitat elements; pollutants; biodiversity; redundancy analysis; Hangzhou Bay