

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20240708002

http://www.yykxjz.cn/

胡浩鹏, 李磊, 田伟, 韩帅, 王凤彪, 蒋玫. 江苏如东文蛤滩涂养殖区沉积物重金属分布特征及其与底栖动物的关系. 渔业科学进展, 2025, 46(2): 106-121

HU H P, LI L, TIAN W, HAN S, WANG F B, JIANG M. Distribution characteristics of heavy metals in sediments and their relationship with benthic fauna in the clam mudflat aquaculture area of Rudong, Jiangsu Province, China. Progress in Fishery Sciences, 2025, 46(2): 106-121

## 江苏如东文蛤滩涂养殖区沉积物重金属分布特征及其与底栖动物的关系\*

胡浩鹏<sup>1,2</sup> 李磊<sup>2</sup> 田伟<sup>2</sup> 韩帅<sup>1,2</sup> 王凤彪<sup>2</sup> 蒋玫<sup>2①</sup>

(1. 上海海洋大学水产与生命学院 上海 201306; 2. 中国水产科学研究院东海水产研究所 上海 200090)

**摘要** 通过2022年9月、12月, 2023年4月、7月对江苏省如东县文蛤(*Meretrix meretrix*)滩涂养殖区4个航次的现场调查, 测定了表层沉积物中Zn、Cr、Cu、Pb、As、Hg和Cd的含量, 运用潜在生态指数法开展了表层沉积物重金属的污染风险评价, 分析了底栖动物群落特征, 分析了沉积物中重金属污染与底栖动物分布的响应关系。结果显示, 表层沉积物中重金属元素平均含量由高到低依次为Cr、Zn、Pb、Cu、As、Cd和Hg, Zn、Cu、Pb、As、Hg和Cd元素符合海洋沉积物质量中的一类标准, 未出现重金属含量超标。Cr元素最高值和夏季平均值超过了海洋沉积物质量一类标准, 符合海洋沉积物质量二类标准。表层沉积物中重金属元素的全年平均潜在生态风险指数为90.49~145.78, 平均值为110.68, 参照潜在生态风险等级划分, 沉积物整体处于中等风险水平。各重金属元素的单项潜在生态风险由高到低依次为Cd、Hg、As、Pb、Cu、Cr和Zn。4次采样中, 共采集到大型底栖动物68种。各采样站位丰富度指数 $d$ 范围为0.74~5.01 ( $SD=\pm 1.19$ ), 均匀度指数 $J'$ 范围为0.25~0.92 ( $SD=\pm 0.15$ ), 多样性指数 $H'$ 的范围为0.99~3.79 ( $SD=\pm 0.65$ )。底栖动物多样性指数 $H'$ 均值均在2~3之间, 生物多样性均属于较丰富水平, 生境等级处于“一般”水平。底栖动物中多毛类密度与Cu、Pb、Cr、Cd重金属元素指数和风险指数RI有明显的负相关关系。底栖动物丰富度指数 $d$ 与Pb、Cr、As重金属元素指数具有明显的负相关关系。研究结果为如东滩涂文蛤滩涂养殖区生态系统重金属污染监测与治理提供了技术依据。

**关键词** 沉积物; 重金属; 底栖动物; 生态风险指数

**中图分类号** X821 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2025)02-0106-16

滩涂位于海陆交界处, 是生态资源极为丰富的区域, 也是人类生存发展的重要空间载体, 受到人类活动影响较强(Geng *et al.*, 2024; Lu *et al.*, 2019)。随着沿海地区社会经济的快速发展, 越来越多的污染物输入

至近岸海域, 严重影响了近岸海域生态环境(Zhao *et al.*, 2019)。滩涂沉积物是各种污染物质的“汇”, 污染物可以通过一系列物理变化如吸附、堆积和沉淀等过程在沉积物中富集(Wang S *et al.*, 2019), 因重金属具有

\* 中央公益科研机构基础研究基金(2020TD14)和国家贝类产业体系建设项目(CARS-49)共同资助。胡浩鹏, Email: 961860523@qq.com

① 通信作者: 蒋玫, 研究员, Email: jiangrose73@163.com

收稿日期: 2024-07-08, 收修改稿日期: 2024-09-29

环境持久性、较高毒性、隐蔽性及生物可蓄积性等特点, 被认为是危害最严重的一类污染物(Ali *et al.*, 2019)。沉积物重金属污染的潜在生态健康风险一直是国内外学者的研究热点(Angon *et al.*, 2024; Ali *et al.*, 2019; 徐勇等, 2019; Wu *et al.*, 2017)。

海洋大型底栖动物通常以沉积物为直接生境, 具有移动能力差、活动范围小的特点。滩涂表层沉积物为底栖动物提供附着、捕食及躲避不利环境的场所, 对底栖动物的产卵、繁殖等生活史的重要阶段起着重要作用。底栖动物对环境污染敏感, 其种类组成和数量变动对生态环境有指示作用, 常作为海洋污染的指示生物(Armitage *et al.*, 1983; Di *et al.*, 1996)。近岸沉积物重金属的生态效应与底栖生物群落结构的变化密切相关, 尽管底栖生物群落结构和功能受到食物、温度、捕食者、污染物等诸多因素的影响, 但重金属是影响底栖生物群落结构和功能的重要潜在因素(吴斌, 2014)。

江苏如东所处位置位于中国最大的辐射沙洲, 地理位置特殊, 海岸线漫长, 滩涂宽阔平坦(刘荣娟等, 2021), 是中国主要的文蛤(*Meretrix meretrix*)产地之一。随着如东沿海经济开发区的高速发展, 大量的沿岸开发使得近岸文蛤养殖海域受到不同程度的污染, 多次导致文蛤大面积死亡, 特别是 2002 年 10 月如东洋口文蛤大面积死亡造成了巨大的经济损失(詹文毅等, 2003)。文蛤滩涂养殖区沉积物面临着重金属等

污染压力。目前, 对江苏如东滩涂沉积物重金属污染的研究大多集中在重金属元素来源和生物毒性评价(廖勇, 2012; 李磊等, 2012; 周超凡等, 2022), 有关江苏如东滩涂重金属分布特征与底栖动物分布特征相关性分析的研究尚未见有报道。本文分析了江苏如东文蛤滩涂养殖区沉积物 7 种重金属元素的分布特征, 应用潜在生态风险指数法评价养殖区沉积物重金属的环境风险。同时, 开展了底栖动物分布特征与重金属污染特征的相关性分析, 旨在为江苏如东贝类滩涂的生态环境以及为文蛤滩涂资源的可持续发展提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查区域

分别于 2022 年 9 月(秋季)、2022 年 12 月(冬季)、2023 年 4 月(春季)、2023 年 7 月(夏季)在江苏如东文蛤滩涂养殖区进行采样调查, 共设置 12 个站位(图 1)。

### 1.2 样品的采集与处理

**1.2.1 沉积物样品** 采集表层沉积物(0~15 cm)样品, 用聚乙烯保鲜袋封装, 风干, 去除杂物和粗颗粒后, 研磨 160 目过筛后混匀。样品的检测参照中华人民共和国质量监督检验检疫总局《海洋调查规范第 5 部分: 沉积物分析》(GB 17378-2007)中的相关规定

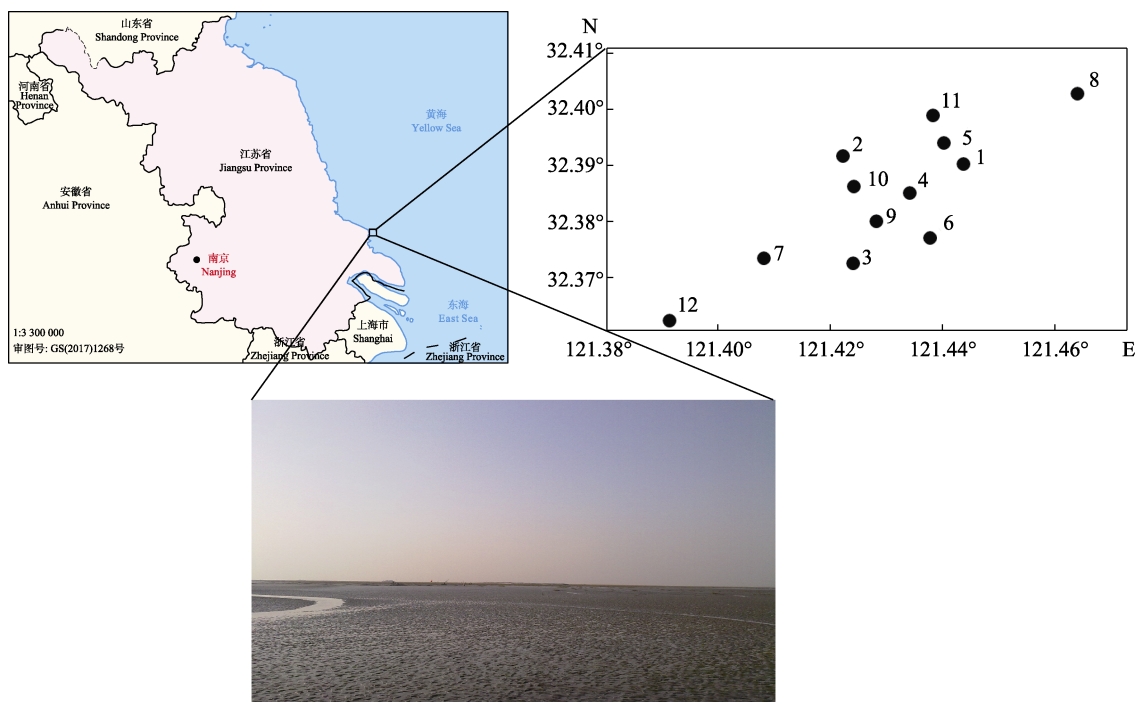


图 1 采样站位设置

Fig.1 Location of sampling stations

执行。Cu、Zn 和 Cr 采用火焰原子吸收分光光度法(Sollar M6 原子吸收光谱仪, 赛默飞世尔科技公司)测定, 称取 0.3 g 样品于坩埚中, 加入 10 mL HCl, 于通风橱内电热板上 90~100 °C 加热, 使样品初步分解, 待消解液蒸发至剩余约 3 mL 时, 加入 9 mL HNO<sub>3</sub>, 加盖加热至无明显颗粒, 加入 5~8 mL HF, 于 120 °C 加热 30 min, 加入 1 mL HClO<sub>4</sub> 于 150~170 °C 加热至冒白烟, 加热时不时摇动坩埚。加入 3 mL HNO<sub>3</sub>, 温热溶解可溶性残渣后冷却定容。Pb 和 Cd 采用无火焰原子吸收分光光度法(MARS 微波消解仪, 美国 CEM 公司)测定, 称取 0.1 g 的样品, 精确到 0.1 mg, 放入微波消解罐内, 加入 8 mL 硝酸, 先 20 min 升温至 190 °C, 保持温度 25 min, 消解完成后将消解液转移至 50 mL 容量瓶, 纯水定容, 待测。Hg 和 As 采用原子荧光法(原子荧光光谱仪 AFS-680, 北京瑞利分析仪器有限公司)测定, 取 0.5 g 干燥样品, 置于耐高压聚四氟乙烯消解罐中, 加入 6 mL HCl 和 2 mL HNO<sub>3</sub>, 振荡摇匀, 放置一段时间, 反应结束后密封消解罐, 放入微波消解炉中消解。消解后冷却至室温、放气、定容, 4 °C 冰箱保存待测。

**1.2.2 底栖动物样品** 用定量采样框(0.5 m×0.5 m)在每个站位取 4~8 个样方, 每个样方的采样面积为 0.25 m<sup>2</sup>。将每个站位多个样方提取的生物样合并为一个样品, 放入旋涡分选装置中淘洗, 用两层筛进行分选(筛孔目 1.0 mm)。底栖动物栖息密度和生物量分别以 ind./m<sup>2</sup> 和 g/m<sup>2</sup> 计算, 具体处理步骤均参照中华人民共和国质量监督检验检疫总局《海洋调查规范第 6 部分: 海洋生物调查》(GB12763.6-2007)进行。

### 1.3 重金属潜在生态风险指数计算

采用 Hakanson (1980)提出的潜在生态风险指数法进行重金属污染评价。其计算公式为:

$$C_f^i = C_s^i / C_n^i \quad (1)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \quad (2)$$

$$RI = \sum E_r^i = \sum T_r^i \times C_s^i / C_n^i \quad (3)$$

式中,  $C_f^i$  为第  $i$  种重金属元素的污染系数,  $C_s^i$  为沉积物中第  $i$  种重金属含量的实测值(mg/kg),  $C_n^i$  为背景值,  $E_r^i$  为第  $i$  种重金属的潜在生态风险系数,  $T_r^i$  为第  $i$  种重金属的毒性响应系数( $T_r^{\text{Hg}}=40$ ,  $T_r^{\text{Cd}}=30$ ,  $T_r^{\text{As}}=10$ ,  $T_r^{\text{Pb}}=T_r^{\text{Cu}}=5$ ,  $T_r^{\text{Cr}}=2$ ,  $T_r^{\text{Zn}}=1$ ), RI 为沉积物中多种重金属潜在生态风险指数。根据李一蒙等(2015)提出的方法, 对生态风险等级划分标准进行调整, 调整后的分级标准见表 1。

表 1 潜在生态风险等级划分

$E_r^i$	RI	生态风险级别 Ecological risk level
<40	<110	轻微 Slight
40~80	110~220	中等 Medium
80~160	220~440	较强 Strong
160~320	≥440	很强 Very strong
≥320		极强 Extreme

本研究选取 1980 年江苏沿海滩涂(陈邦本等, 1985)重金属元素浓度作为如东近海环境中的自然背景值( $C_n^i$ ), Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、As 和 Hg 含量分别为 15.02、11.4、47.15、0.04、60.11、7.38 和 0.023 mg/kg。该背景值已被广泛应用于相关研究中(周超凡等, 2022)。

### 1.4 底栖动物多样性指数

采用物种优势度指数、物种丰富度指数  $d$ 、物种多样性指数  $H'$  和物种均匀度指数  $J'$  分析文蛤滩涂养殖区大型底栖动物的群落特征。

物种优势度指数计算:

$$y = f_i \times p_i \quad (4)$$

物种丰富度指数  $d$  采用中华人民共和国质量监督检验检疫总局海洋《调查规范第 7 部分: 海洋调查资料交换》(GB/T 12763.6-2007) Margalef 指数计算:

$$d = \frac{S-1}{\log_2 N} \quad (5)$$

物种多样性指数  $H'$  采用中华人民共和国质量监督检验检疫总局海洋《调查规范第 7 部分: 海洋调查资料交换》(GB/T 12763.6-2007) Shannon 指数计算:

$$H' = -\sum \left( \frac{n_i}{N} \right) \times \log_2 \left( \frac{n_i}{N} \right) \quad (6)$$

物种均匀度指数  $J'$  采用中华人民共和国质量监督检验检疫总局海洋《调查规范第 7 部分: 海洋调查资料交换》(GB/T 12763.6-2007) Pielou 指数计算:

$$J' = H' / \log_2 S \quad (7)$$

式中,  $f_i$  为种  $i$  在采样点的出现频率,  $p_i$  为种  $i$  的个体数占总个体数的比,  $N$  为生物个体数,  $S$  为样品中的种类总数,  $n_i$  为第  $i$  种的个体数。 $y > 0.02$  时, 定为优势种。

### 1.5 多样性指数评价法

参照中华人民共和国生态环境部《近岸海域环境

监测规范》(HJ442-2008)中的生物多样性指数评价标准来评价生境质量等级(表 2)。

## 1.6 数据处理

采用约束排序(constrained ordination)方法分析文蛤滩涂养殖区大型底栖动物种类组成与重金属元素指数的关系,物种矩阵通过转换,对 12 个采样点的 7 个重金属元素指数和 4 种大型底栖生物类群(多毛类、软体动物、节肢动物及其他动物)进行分析。通过除趋势对应分析(DCA)确定模型。如果 4 个轴中的最大梯度 $>4$ ,则应采用单峰模型(典范对应分析,CCA)进行分析;如果最大梯度 $<3$ ,则宜采用线性模型(冗余分析,RDA);而若最大梯度介于 3 和 4 之间,则 2 种模型均可使用。重金属元素指数的显著性由蒙特卡罗置换检验确定(刘小雪等,2022)。采用生态学统计分析软件 Canoco 4.5 进行分析。

采用 CorelDRAW Graphics Suite 2024 软件制作站位图,采用 SPSS 25.0 软件进行实验数据的统计分析,采用 Origin 8.0 和 Surfer 25 软件绘图。

## 2 结果

### 2.1 沉积物中重金属的含量及空间分布

表层沉积物中各重金属元素的含量变化情况见表 3,Zn、Cu、Pb、As、Hg 和 Cd 元素均符合国标中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局《海洋沉积物质量》(GB18668-2002)中的一类标准,未出现重金属含量超标。Cr 元素最高值和夏季平均值超过了海洋沉积物质量一类标准,符合海洋沉积物质量二类标准。表层沉积物中重金属元素平均含量由高到低依次为 Cr、Zn、Pb、Cu、As、Cd 和 Hg。各元素变异系数由高到低依次为 Hg、Cd、Cr、As、Pb、Cu 和 Zn。

表 2 多样性指数分级评价标准  
Tab.2 Diversity index grading evaluation criteria

指数范围 Index range	级别 Level	评价状态 Evaluation of status	生境质量等级 Habitat quality class
$H'>3$	丰富 Abundant	物种种类丰富,个体分布均匀	优良 Excellent
$2<H'\leq 3$	较丰富 Rich	物种丰富度较高,个体分布比较均匀	一般 Average
$1<H'\leq 2$	一般 Average	物种丰富度较低,个体分布比较均匀	差 Poor
$0<H'\leq 1$	贫乏 Poor	物种丰富度低,个体分布不均匀	极差 Highly poor
$H'=0$	极贫乏 Extremely poor	物种单一,多样性基本丧失	特差 Extremely poor

表 3 沉积物重金属元素含量变化  
Tab.3 Changes of heavy metal elements in sediments

元素 Element	Cu	Zn	Cr	Pb	Cd	As	Hg
最高 Maximum/(mg/kg)	10.40	48.20	106.00	17.50	0.12	8.15	0.060
最低 Minimum/(mg/kg)	6.30	30.50	48.00	7.40	0.01	3.92	0.010
春季平均 Average in spring /(mg/kg)	7.21	41.63	53.50	10.79	0.02	5.37	0.030
夏季平均 Average in summer/(mg/kg)	8.50	37.41	87.67	15.04	0.08	5.93	0.016
秋季平均 Average in Autumn/(mg/kg)	7.83	41.38	61.00	12.73	0.09	5.17	0.021
冬季平均 Average in Winter/(mg/kg)	9.39	40.55	60.00	13.38	0.09	5.02	0.021
全年平均 Annual average/(mg/kg)	8.23	40.24	65.54	12.99	0.07	5.37	0.022
标准差 Standard deviation	1.05	4.57	14.21	1.80	0.03	0.98	0.01
变异系数 Variable coefficient/%	12.76	11.36	21.68	13.90	41.49	18.31	55.44
背景值 Background value/(mg/kg)	15.02	47.15	60.11	11.40	0.04	60.11	0.02
海洋沉积物质量一类/二类标准 Marine sedimentary evaluation criterion ( I / II)/(mg/kg)	35/100	150/350	80/150	60/130	0.50/1.50	20/65	0.20/0.50

沉积物中重金属的赋存量能够反映该区域重金属的污染水平,其平面分布状况能够映射该区域的重金属来源,并进一步掌握该污染物的扩散情况。江苏如

东滩涂表层沉积物平均重金属含量的空间分布见图 2。整体上,4 个季节江苏如东滩涂表层沉积物中 Zn、Cu、Pb、As、Hg、Cd 和 Cr 的含量分布趋势为调查区域从

南到北依次降低, 高值区位于调查区域中部。江苏如东滩涂沉积物中 Cu 含量随着离陆地的距离增加含量而减少。调查区域南部的 Zn 含量最高, 从南到北含量依次降低。Cr 含量最高的区域位于调查区域东南部, 西南部出现 Cr 含量高值中心, 调查区域从南到北含量依次降低。Pb 含量最高的区域位于调查区域的西南

部, 东北部出现 Pb 含量高值中心, 从西南部依次减小到中部出现最小值, 随后又逐步增大。调查区域的 Cd 含量呈现西部低、东部高的特点, 最高值出现在中东部。调查区域的 As 含量东南部低, 东北部和西南部都有高值的出现。Hg 含量呈现调查区域中部高、四周低的特点, 最高值出现在调查区域中部。

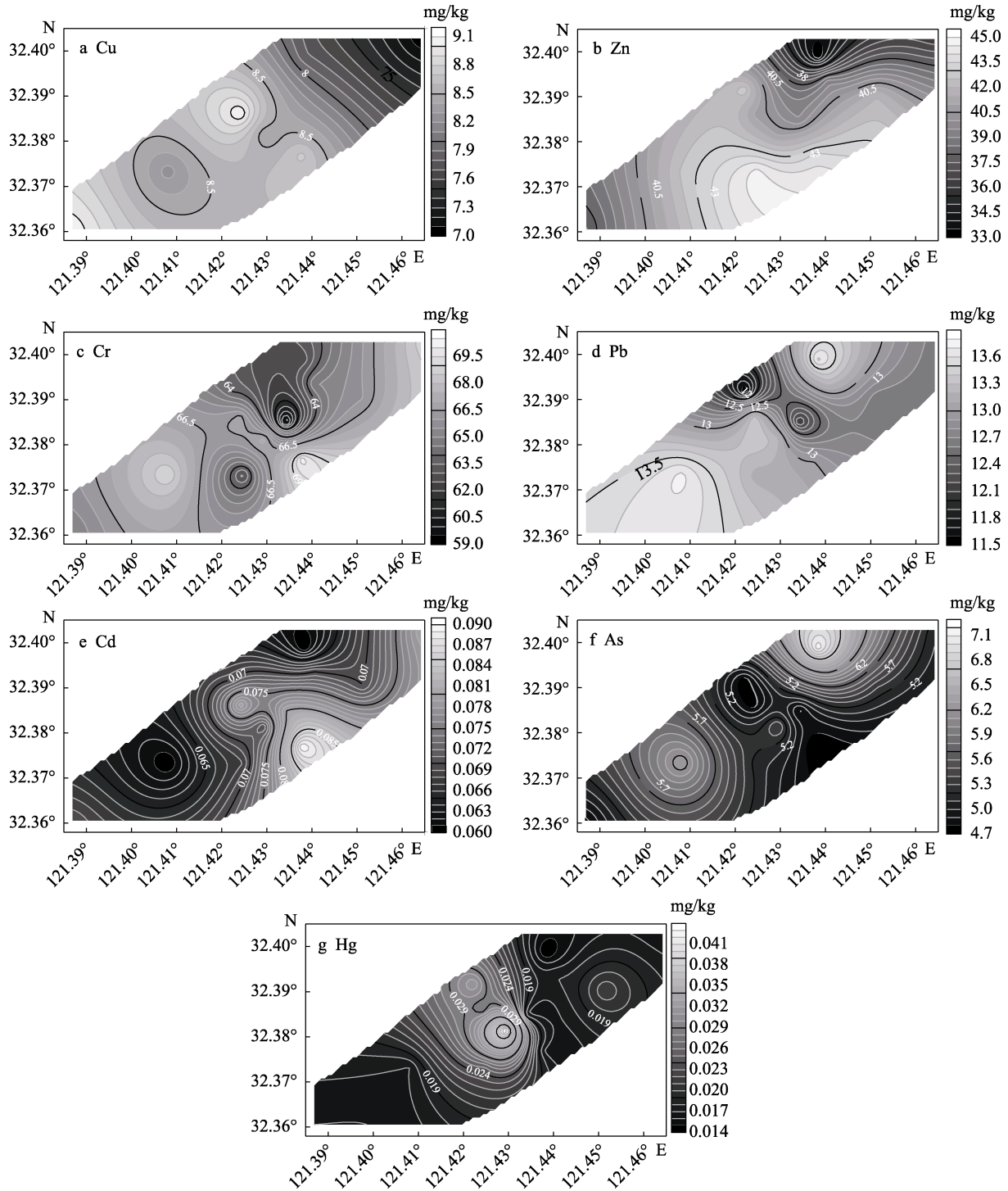


图2 沉积物平均重金属含量空间分布

Fig.2 Spatial distribution of average heavy metal content in sediments

## 2.2 沉积物中重金属潜在生态风险评价

江苏如东滩涂表层沉积物中重金属 Cu、Zn、Cr、Pb 和 As 的单项潜在生态风险指数均小于 40 (表 4), 属轻微风险, Cd 和 Hg 的单项潜在生态风险指数  $E_r^i$  较高, 分别为 45.00~65.63、24.35~76.09, 所有站位 Cd 为中等风险, 约有 33% 的站位 Hg 属于中等风险, 其余站位为轻微风险。各重金属的平均单项潜在生态风险指数  $E_r^i$  为 Cd>Hg>As>Pb>Cu>Cr>Zn。

全年平均综合潜在生态风险指数为 90.49~145.78, 平均值为 110.68, 参照潜在生态风险等级划

分, 沉积物整体处于中等风险水平。12 个采样站位中, 9 号站的风险指数值 RI 最高(145.78), 处于中等风险水平; 11 号站的风险指数值 RI 最低(90.49), 处于轻微风险水平。各重金属的单项潜在生态风险指数  $E_r^i$  为 Cd>Hg>As>Pb>Cu>Cr>Zn。

各采样站位中重金属单项潜在生态风险指数  $E_r^i$  占 RI 的比例见图 3。各采样站位生态风险主要来自 Cd、Hg 和 As。4 次采样中, 重金属 Cd 是如东滩涂沉积物潜在生态风险最高的主要贡献元素, 也是如东滩涂沉积物污染的主要元素。

表 4 重金属元素的潜在生态风险指数

Tab.4 Potential ecological risk index (RI) of heavy metal elements

站点 Station	$E_r^i$							RI	生态风险级别 Ecological risk level
	Cu	Zn	Cr	Pb	Cd	As	Hg		
1	2.53	0.89	2.20	5.54	54.38	7.20	38.26	110.99	中等 Medium
2	2.66	0.91	2.13	5.04	54.38	6.42	54.78	126.32	中等 Medium
3	2.61	0.95	2.09	5.77	50.63	6.97	42.61	111.62	中等 Medium
4	2.85	0.84	1.96	5.30	58.13	6.46	29.57	105.09	轻微 Slight
5	2.80	0.83	2.16	5.81	54.38	8.45	30.87	105.29	轻微 Slight
6	2.90	0.93	2.34	5.69	65.63	6.39	30.00	113.87	中等 Medium
7	2.75	0.90	2.30	6.02	46.88	8.57	28.70	96.10	轻微 Slight
8	2.34	0.77	2.29	5.55	56.25	6.92	28.26	102.37	轻微 Slight
9	2.80	0.87	2.24	5.80	50.63	7.37	76.09	145.78	中等 Medium
10	3.03	0.87	2.22	5.87	56.25	6.43	49.13	123.79	中等 Medium
11	2.60	0.70	2.09	6.02	45.00	9.73	24.35	90.49	轻微 Slight
12	3.02	0.79	2.16	5.94	50.63	6.46	27.39	96.40	轻微 Slight
平均 Average	2.74	0.85	2.18	5.70	53.59	7.28	38.33	110.68	

综合潜在生态风险指数的空间分布见图 4。春季, 风险指数值 RI 2 号站最高(108.64), 最低为 12 号站(72.55), 其余站位均处于轻微风险水平; 夏季, 10 号风险指数值 RI 最高为 116.82, 其次为 1 号站(111.49), 其余站位均处于轻微风险水平; 秋季和冬季, 风险指数值 RI 最高的前 3 位为 9 号站>10 号站>2 号站(143.62), 秋季和冬季各有 8 个站位为中等风险水平。综合潜在生态风险指数平均值冬季最高(125.32)、秋季其次(123.90), 处于中等风险水平; 夏季较低(105.98)、春季最低(87.51), 处于轻微风险水平。

江苏如东滩涂平均综合潜在生态风险指数的空间分布见图 5。平均综合潜在生态风险指数分布趋势呈现中部高、西南部低的特点。高值区位于调查区域的中部, 最低值出现在调查区域西南部。

## 2.3 底栖动物生物指标的时空分布

4 次采样中, 共采集到大型底栖动物 68 种(表 5),

包括多毛类 30 种, 软体动物 18 种, 节肢动物 14 种, 腔肠动物 4 种, 纽形动物 1 种, 腕足动物 1 种。其中, 4 号站采集到的种类最多, 为 22 种; 其次 3 号站采集到 18 种, 7 号站采集到种类最少, 为 12 种。各采样站位丰富度指数  $d$  范围为 0.74~5.01(SD=±1.19), 均匀度指数  $J'$  范围为 0.25~0.92(SD=±0.15), 多样性指数  $H'$  的范围为 0.99~3.79(SD=±0.65)。

文蛤滩涂养殖区底栖动物生物指标时空分布见图 6 所示。春季丰富度指数  $d$  平均值为 4.28, 均匀度指数  $J'$  平均值为 0.50, 多样性指数  $H'$  平均值为 2.54; 夏季丰富度指数  $d$  平均值为 1.50, 均匀度指数  $J'$  平均值为 0.66, 多样性指数  $H'$  平均值为 2.10; 秋季丰富度指数  $d$  平均值为 3.57, 均匀度指数  $J'$  平均值为 0.56, 多样性指数  $H'$  平均值为 2.65; 冬季丰富度指数  $d$  平均值为 3.77, 均匀度指数  $J'$  平均值为 0.49, 多样性指数  $H'$  平均值为 2.32。其中, 3 号站的丰富度指数  $d$ 、多样性指数  $H'$  最大, 8 号站的均匀度指数  $J'$  最大。11 号

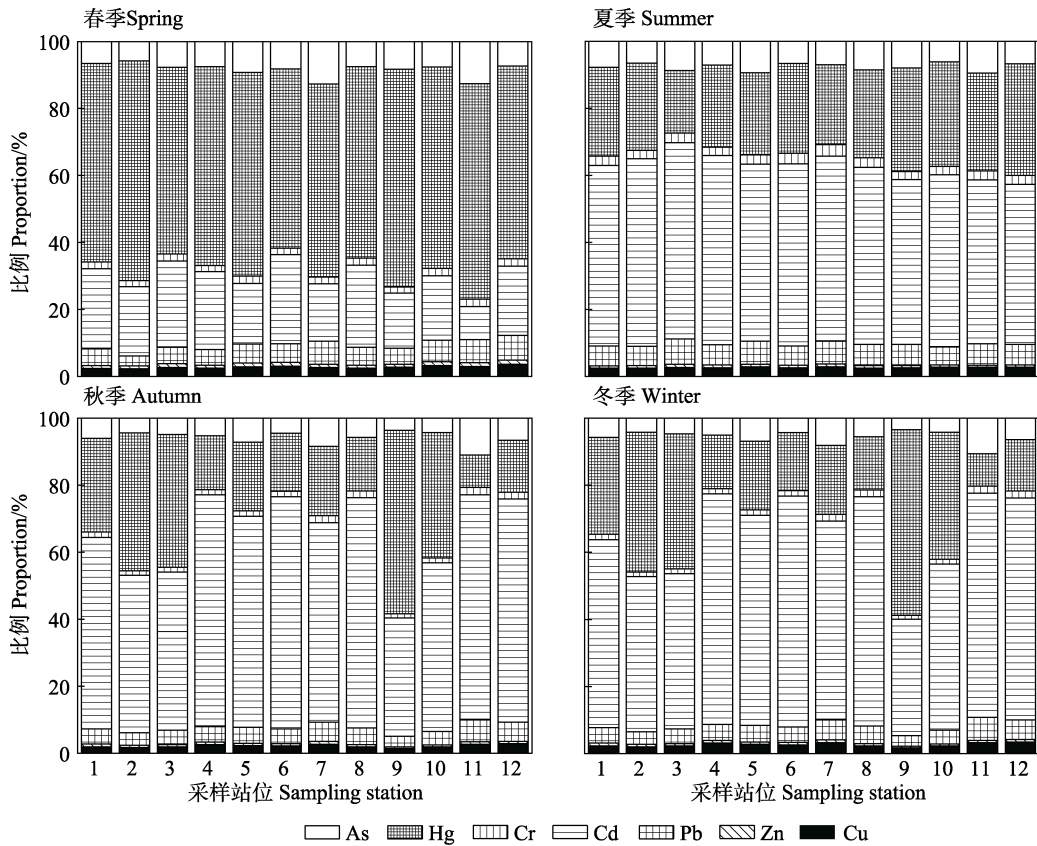


图 3 不同重金属  $E_r^i$  占 RI 的比例

Fig.3 The proportion of different heavy metals  $E_r^i$  in RI

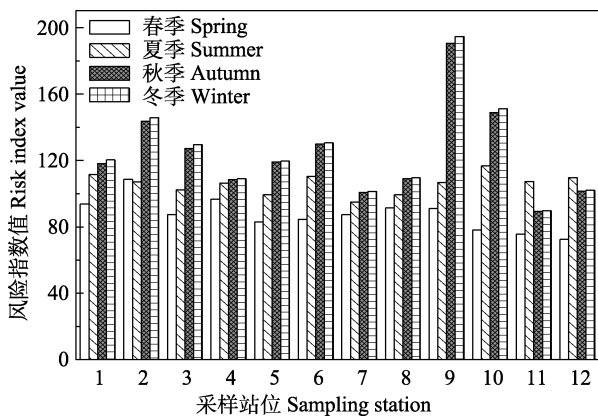


图 4 表层沉积物重金属综合潜在生态风险指数分布  
Fig.4 Comprehensive potential ecological risk index distribution of heavy metals in surface sediments

站多毛类密度最高,软体动物密度最大值出现在 10 号站,节肢动物密度最大值出现在 9 号站。从时间分布来看,多毛类密度、软体动物密度最高出现在春季,春季丰富度指数  $d$ 、多样性指数  $H'$  最大,冬季的节肢动物密度最高。夏季的均匀度指数  $J'$  最大。4 个季节多样性指数  $H'$  均值均在 2~3 之间,对照生物多样性

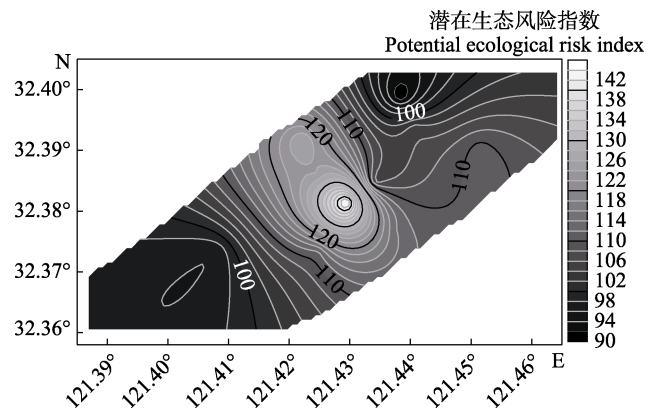


图 5 江苏如东滩涂平均综合潜在生态风险指数空间分布  
Fig.5 Spatial distribution of average comprehensive potential ecological risk index in Rudong tidal flat of Jiangsu Province

指数评价标准,4 个季节生物多样性均属于较丰富水平,生境等级处于“一般”水平。

### 2.4 重金属潜在生态风险与底栖动物特征的相关性

将如东滩涂各站位底栖动物特征与其沉积物重金属元素指数进行相关性分析(表 6),结果显示,底

表 5 江苏如东滩涂大型底栖动物物种名录  
Tab.5 Species list of macrobenthos in Rudong mudflats, Jiangsu, China

类群 Group	种名 Species	拉丁名 Latin name	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
多毛类 Polychaeta	智利巢沙蚕	<i>Diapatra chiliensis</i>	+	+	+	+
	角海蛭	<i>Ophelina acuminata</i>			+	
	寡节甘吻沙蚕	<i>Glycinderis gurjanovae</i>	+	+	+	+
	浅古铜吻沙蚕	<i>Glycera subaenea</i>	+	+	+	+
	加州齿吻沙蚕	<i>Nephtys californiensis</i>	+	+	+	+
	尖锥虫	<i>Scoloplos armiger</i>	+	+	+	+
	后指虫	<i>Laonice cirrata</i>	+	+	+	
	小头虫科一种	<i>Capitellidae</i> sp.	+		+	
	软疣沙蚕	<i>Tylonereis bogoyawleskyi</i>			+	+
	躁尖索沙蚕	<i>Scoletoma impatiens</i>			+	
	红纹腹沟虫	<i>Scolelepis daphninos</i>			+	
	中阿曼吉虫	<i>Armandia intermedia</i>	+			+
	躁尖索沙蚕	<i>Scoletoma impatiens</i>	+	+		+
	中国中蚓虫	<i>Mediomastus chinensis</i>	+	+		+
	红纹腹沟虫	<i>Scolelepis daphninos</i>	+			+
	中华半突虫	<i>Phyllodoce chinensis</i>				+
	亚洲锡鳞虫	<i>Sigalion asiatica</i>	+	+		+
	太平洋稚齿虫	<i>Prionospio pacifica</i>	+			+
	三叶针尾涟虫	<i>Diastylis tricincta</i>	+			+
	欧文虫	<i>Owenia fusiformis</i>	+			+
	独指虫	<i>Aricidea fragilis</i>	+	+		+
	乳突半突虫	<i>Phyllodoce papillosa</i>	+			
	张氏神须虫	<i>Phyllodocimorpha</i>	+			
	双唇索沙蚕	<i>Lumbrineris cruzensis</i>	+			
	多鳃齿吻沙蚕	<i>Nephtys polybranchia Southern</i>			+	
	膜质伪才女虫	<i>Pseudopolydora kempfi</i>			+	
	足刺拟单指虫	<i>Cossurella aciculata</i>				
日本强鳞虫	<i>Sthenolepis japonica</i>			+	+	
含糊拟刺虫	<i>Linopherus ambigua</i>			+		
强鳞虫	<i>Sthenolepis japonica</i>	+				
软体动物 Mollusk	秀丽织纹螺	<i>Nassarius festivus</i>	+	+	+	
	婆罗囊螺	<i>Retusa borneensis</i>	+	+	+	+
	泥螺	<i>Bullacta exarata</i>	+	+	+	+
	四角蛤蜊	<i>Mactra veneriformis</i>	+	+	+	+
	短文蛤	<i>Periglypta petechialis</i>			+	
	半褶织纹螺	<i>Nassarius semiplicata</i>			+	
	扁玉螺	<i>Neverita didyma</i>			+	
	紫彩血蛤	<i>Nuttallia olivacea</i>	+	+	+	+
	菲律宾蛤仔	<i>Ruditapes philippinarum</i>			+	
	彩虹蛤	<i>Iridona iridescens</i>	+	+	+	+
	朝鲜笋螺	<i>Terebra koreana</i>	+	+	+	+
	泰氏笋螺	<i>Terebra</i>		+		
	托氏蛞蝓	<i>Umbonium tomasi</i>	+	+	+	+
	日本镜蛤	<i>Dosinorbis japonica</i>				+
	短文蛤	<i>Meretrix petechialis</i>		+		+
	大竹蛏	<i>Solen grandis</i>				+
丽核螺	<i>Tritonoharpa leali</i>				+	
半褶织纹螺	<i>Nassarius semiplicatus</i>			+		



续表 5

类群 Group	种名 Species	拉丁名 Latin name	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
节肢动物 Arthropod	三疣梭子蟹	<i>Portunus trituberculatus</i>			+	
	东方长眼虾	<i>Ogyrides orientalis</i>	+		+	+
	硬爪始根钩虾	<i>Eohaustorius cheliferus</i>	+		+	+
	短身大眼蟹	<i>Macrophthalmus dilatatum</i>	+	+	+	+
	红线黎明蟹	<i>Matuta palnipes</i>			+	+
	圆球股窗蟹	<i>Scopimera globosa</i>	+			+
	广布美人虾	<i>Callianassa divergens</i>			+	
	网纹纹藤壶	<i>Amphibalanus reticulatus</i>			+	
	朝鲜独眼钩虾	<i>Monoculodes koreanus</i>	+	+	+	+
	朝鲜马尔他钩虾	<i>Melita koreana</i>				+
	东方长眼虾	<i>Ogyrides orientalis</i>				+
	硬爪始根钩虾	<i>Eohaustorius cheliferus</i>		+	+	+
	钩额湿尖头钩虾	<i>Mandibulophoxus uncirostratus</i>	+	+	+	+
	东方尾钩虾	<i>Urothoe orientalis</i>			+	+
	腔肠动物 Coelenterate	沙箸海鳃属一种	<i>Virgularia</i> sp.	+	+	+
日本爱氏海葵		<i>Edwardsia japonica</i>			+	+
海葵目一种		<i>Actinaria</i> sp.				
东方角海葵		<i>Cerianthus orientalis</i>				
腕足动物 Brachiopoda	鸭嘴海豆芽	<i>Lingula anatina</i>	+	+	+	+
	纽形动物 Nemertinea	纽虫 <i>Nemertinea</i>	+	+		

栖动物中多毛类密度与 Cu、Pb、Cr、Cd 重金属元素指数和 RI 具有显著负相关关系( $r = -0.343$ ,  $P < 0.05$ ;  $r = -0.546$ ,  $P < 0.01$ ;  $r = -0.463$ ,  $P < 0.01$ ;  $r = -0.460$ ,  $P < 0.01$ ;  $r = -0.301$ ,  $P < 0.05$ )。底栖动物丰富度指数  $d$  与 Pb、Cr、As 重金属元素指数具有显著负相关关系( $r = -0.733$ ,  $P < 0.01$ ;  $r = -0.861$ ,  $P < 0.01$ ;  $r = -0.355$ ,  $P < 0.05$ )，底栖动物多样性指数  $H'$  与 Pb、As 重金属元素指数具有显著负相关关系( $r = -0.369$ ,  $P < 0.01$ ;  $r = -0.297$ ,  $P < 0.05$ )。

根据 DCA 结果，各排序轴的最大梯度长度小于 3，选用线性模型(冗余分析, RDA)分析大型底栖动物和重金属环境因子的关系，结果见图 7。通过将各类群大型底栖动物密度和重金属元素指数进行转换，并经过蒙特卡罗置换检验，预选出符合条件的重金属环境因子，显示为 Cr (显著性水平  $P = 0.004$ ,  $F$  检验值  $\sigma_F = 7.1$ )、Cu ( $P = 0.19$ ,  $\sigma_F = 1.7$ )、Zn ( $P = 0.276$ ,  $\sigma_F = 1.2$ )、Cd ( $P = 0.366$ ,  $\sigma_F = 1.0$ )、Hg ( $P = 0.416$ ,  $\sigma_F = 1.0$ )、As ( $P = 0.57$ ,  $\sigma_F = 0.6$ )、Pb ( $P = 0.648$ ,  $\sigma_F = 0.5$ )。大型底栖动物密度在轴 1 与轴 2 的解释率分别为 16.65%、5.25%，累计解释率为 21.9%。由图中箭头长度可看出，重金属环境因子和大型底栖动物种类的相关性由大到小依次为 Cr、Pb、Cu、Hg、Zn、Cd 和 As。

### 3 讨论

#### 3.1 沉积物中重金属含量季节变化特征及区域对比

4 次调查结果显示，江苏如东滩涂沉积物中重金属年平均含量无明显变化，Cr 元素最高值和夏季平均值超过了海洋沉积物质量一类标准，符合海洋沉积物质量二类标准。Hg 的变异系数最大，达 55.44%，其次是 Cd，变异系数为 41.49%，这表明 Hg 和 Cd 的含量空间分布相对不均匀，离散性较大，主要是由于这 2 种元素在滩涂内局部地区受到某种潜在来源的控制。重金属 Cu、Zn、Cr、Pb 和 As 变异系数均小于 40%，表明其含量的空间分布相对均匀，波动程度小，说明在滩涂水动力条件下，其迁移能力较强，含量受自然和人为的共同影响。

本研究中重金属 Cu、Zn、Cd 和 Hg 的冬季平均含量高于夏季，与焦龙等(2016)通过实验验证温度升高会促进沉积物中的重金属离子向上覆水体释放的结果相一致，温度升高会促进沉积物中重金属向水相的迁移，季节性的温度变化会对沉积物中重金属的释放量产生影响。如东滩涂各站主要生态风险来自 Cd、Hg 和 As，这 3 种重金属是工业排污的重要成分，

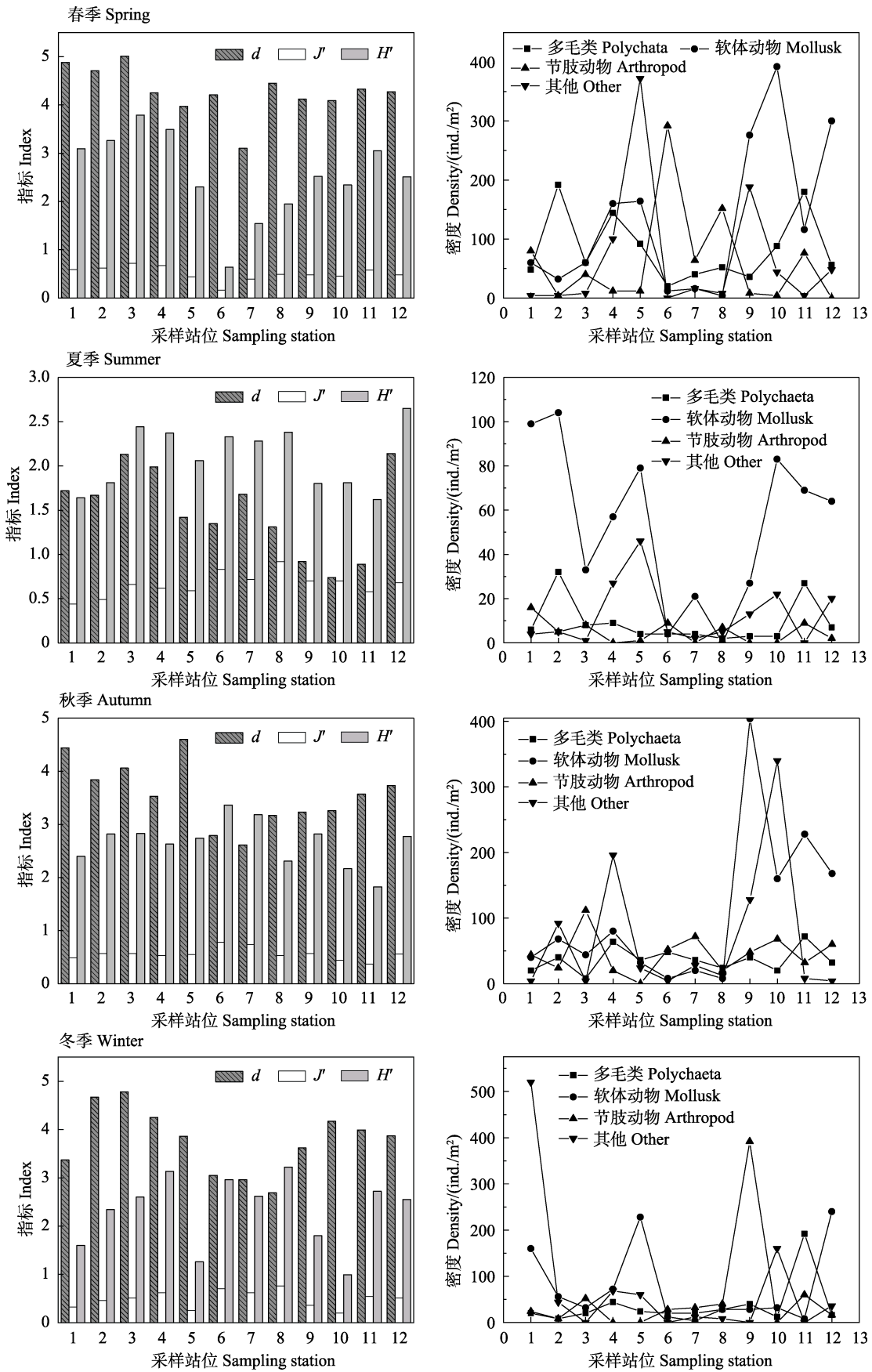


图 6 底栖动物生物指标时空分布

Fig.6 Temporal and spatial distribution of benthic biological indicators

表6 沉积物重金属元素指数与底栖动物特征的相关性  
Tab.6 Correlation between sediment heavy metal element index and benthic animal characteristics

	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Hg	As	RI
丰富度指数 $d$	-0.225	0.373**	-0.733**	-0.270	-0.861**	0.343*	-0.355*	-0.009
均匀度指数 $J'$	-0.073	-0.183	0.154	0.107	0.437**	-0.265	-0.032	-0.121
多样性指数 $H'$	-0.208	0.079	-0.369**	-0.030	-0.222	-0.019	-0.297*	-0.077
多毛类动物密度 Polychaeta density	-0.343*	-0.136	-0.546**	-0.463**	-0.460**	0.159	0.120	-0.301*
软体动物密度 Mollusk density	-0.017	0.004	-0.165	-0.235	-0.245	0.238	-0.103	-0.023
节肢动物密度 Arthropod density	-0.061	0.301*	-0.142	-0.102	-0.216	0.447**	-0.067	0.277
其他密度 Other density	0.020	0.252	-0.179	0.010	-0.227	0.183	-0.143	0.147

注: \* $P < 0.05$ ; \*\* $P < 0.01$ (双尾检验 two-sided test)。

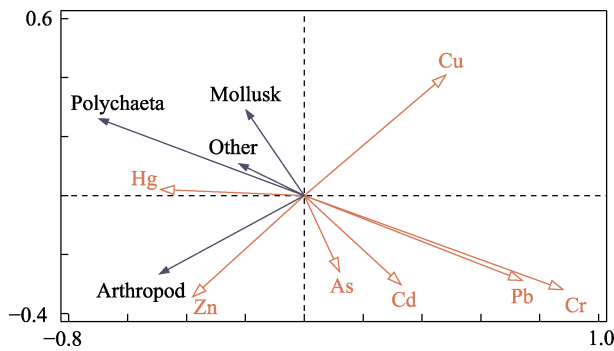


图7 大型底栖动物群落与重金属环境因子相关性分析结果  
Fig.7 Correlation analysis results between macrobenthic communities and heavy metal environmental factors

陆源输入等途径是其主要来源(Lin *et al.*, 2021)。As 在自然环境中极少,它是化肥和农药的主要成分(Tang *et al.*, 2019),滩涂贝类养殖区使用农药消杀贝类敌害物种是 As 污染的主要来源。沉积物中大部分 Pb 来自大气沉降,且 Pb 与区域内渔港船舶的污染排放有关(Saeedi *et al.*, 2009)。研究表明,Zn 与镀锌工业和机械制造业有关,而 Cr 则大量应用于化工业和镀铬工业(刘珊珊等, 2013),调查区域近岸不断发展的化工及港口码头行业为这些重金属提供了陆源输入途径。

本研究中所有重金属元素含量由陆向海变化不大,与黄华瑞等(1992)研究的滩涂沉积物中的重金属含量由陆向海明显减少的结果不一致,可能与如东涨潮历时略大于落潮历时,平均涨潮流速小于平均落潮流速,潮周期内推移质有一定的向海净运输(刘秀娟等, 2010)有关。同时,该区域贝类人工采捕活动中各类机械设备带来的油污亦会导致重金属分布特征发生变化,影响沉积物重金属分布格局的改变。

将本研究区域与国内外农渔业区对比(表 7),可以看出不同地区、不同类型之间的重金属含量差异很

大。本研究区域 Cr 浓度与国内其他地区基本保持一致,但显著高于国外滩涂,污染程度偏高。除 Cr 外,其余 6 种重金属(Cu、Zn、Pb、Cd、As 和 Hg)浓度均处于较低水平。本研究区域 4 种重金属(Cu、Zn、Pb 和 Cd)浓度显著低于波斯湾。对比江苏沿海滩涂,本研究区域除 Cr 以外 6 种重金属含量均偏低,说明如东滩涂在江苏沿海滩涂中为受到重金属污染较轻的区域。本调查区域以砂质底质为主(黄润秋等, 2020),底质沉积物较细时,重金属含量较高;底质为粗颗粒时,重金属含量较低(罗昆等, 2017)。

### 3.2 大型底栖动物特征季节变化

4 个季节中,大型底栖动物物种数为冬季>秋季>春季>夏季,不同季节均以多毛类物种数最多,软体动物类群其次。大型底栖动物 3 种多样性指数中,丰富度指数  $d$  春季最高,夏季最低;均匀度指数  $J'$  夏季最高,冬季最低;多样性指数  $H'$  秋季最高,夏季最低。本次调查中,夏季各站位的多样性指数  $H'$  值均小于 3,生境质量等级为一般水平,主要是由于夏季文蛤采收,采捕翻耙活动对表层的沉积环境造成剧烈的物理扰动,对大型底栖动物的生境造成了一定的破坏(丁敬坤等, 2020)。另外,文蛤的养殖活动对大型底栖动物生态系统有扰动作用,文蛤自身的滤食和挖掘等活动对该区域沉积环境的化学过程产生扰动。

本次调查江苏如东文蛤滩涂养殖区年平均总栖息密度为 231.2 ind./m<sup>2</sup>,年平均总生物量为 404.3 g/m<sup>2</sup>。与临近的江苏启东滩涂养殖区调查(张虎等, 2009)、江苏中南部潮间带(张虎等, 2014)以及长江口北支水域潮间带(罗民波等, 2006)相比,本次调查江苏如东文蛤滩涂养殖区底栖动物生物量和栖息密度均高于上述附近滩涂生物量和栖息密度,说明本区域生物资源量较丰富。

表 7 不同地区滩涂表层沉积物重金属浓度比较(mg/kg)

Tab.7 Comparison of concentrations of heavy metals in surface sediments of tidal flats in different areas (mg/kg)

调查区域 Survey area	类型 Type	Cu	Zn	Cr	Pb	Cd	As	Hg	参考文献 Reference
江苏沿海滩涂 Jiangsu coastal beach	农渔业区 Agricultural and fishery area	18.82	60.8	60.8	14.38	0.12	12.9	0.010	张蓝天等, 2023
珠江口 Pearl River estuary	围垦滩涂 Reclamation of tidal flats	51.6	282.7	78.3	28.5	3.67			李取生等, 2007
江苏启东 Jiangsu, Qidong	农渔业区 Agricultural and fishery area	21.69	63.46	40.63	22.13	0.19	8.39	0.022	周翔等, 2023
Asalouyeh Town, Persian Gulf	农业区 Agricultural area	116.84	247.88	11.09	164.89	5.06			Arfaeina <i>et al</i> , 2019
江苏如东 Jiangsu, Rudong	贝类养殖区 Shellfish farming area	8.23	40.23	65.54	12.99	0.07	5.37	0.022	本研究 This study

### 3.3 沉积物中重金属污染与底栖动物分布的响应关系

底栖动物的生活史与表层沉积物存在密切关联, 底栖生物的生长、发育、筑巢、觅食以及繁殖等生命活动全部或部分过程在表层沉积物中完成。底栖动物在生命过程中会从沉积物中蓄积大量重金属, 当重金属在底栖动物体内蓄积浓度达到一定阈值时, 就会对底栖动物的生理生化、遗传基因表达、新陈代谢、行为方式等过程产生毒性效应, 影响底栖动物种群以及群落结构的完整和多样性(田文龙, 2022)。

本研究中底栖动物多毛类密度与 Cu、Pb、Cr、Cd 重金属元素指数和 RI 具有明显的负相关关系, 说明重金属生态风险较高的地方不适宜多毛类动物生存。本研究中多毛类动物密度与 Cu、Pb、Cr、Cd 重金属元素指数和 RI 具有明显的负相关关系, 当沉积物中重金属含量较高时, 生物多样性会降低, 导致耐污种大量存活, 并成为优势种(戴奇等, 2010), 影响本调查海域中多毛类动物种群的变动。本研究结果与张莹等(2012)及杨丽等(2005)的研究结果相一致。

本研究中节肢动物密度与 Hg 重金属元素指数呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ), 与 Zn 重金属元素指数呈显著正相关关系( $P < 0.05$ ), 可能是由于节肢动物具有较强的耐受性。据研究, 节肢动物可以通过粪便、蜕皮壳、中肠上皮组织和细胞等将重金属排出体外(李博雅等, 2019)。本研究结果与 Wang X 等(2019)研究发现, 部分节肢动物与沉积物 Cr、Pb 浓度呈极显著正相关的结果相一致。不同研究中底栖动物不同类群与重金属的相关性分析说明暴露于重金属的底栖动物在群落结构和功能上可能会发生一系列变化, 例如物种组成和丰度(吴斌, 2014), 这种相关性也在李利强等(2016)报道的寡毛类底栖动物密度与重金属含量呈极显著正相关的研究中得到印证。本研究中底栖

动物丰富度指数  $d$  与 Pb、Cr、As 重金属元素指数具有明显的负相关关系, 多样性指数  $H'$  与 Pb、As 重金属元素指数具有明显的负相关关系, 说明沉积物重金属含量对于底栖动物多样性和丰富性有较大负面影响, 易导致物种单一化(徐霖林等, 2011)。

## 4 结论

本研究通过对江苏如东县文蛤滩涂养殖区 7 种重金属元素污染特征调查发现, Zn、Cu、Pb、As、Hg 和 Cd 元素均符合《海洋沉积物质量》(GB18668-2002)中的一类标准, 未出现重金属含量超标。Cr 元素最高值和夏季平均值超过了海洋沉积物质量一类标准, 符合海洋沉积物质量二类标准。调查区域的平均综合潜在生态风险指数 RI 分布趋势呈现中部高、西南部低的特点。各重金属的单项潜在生态风险指数由高到低依次为 Cd、Hg、As、Pb、Cu、Cr 和 Zn。4 个季节中, 多样性指数  $H'$  均值在 2~3 之间, 生物多样性均属于较丰富水平, 生境等级处于“一般”水平。底栖动物中多毛类密度与 Cu、Pb、Cr、Cd 重金属元素指数和 RI 具有明显的负相关关系。丰富度指数  $d$  与 Pb、Cr、As 重金属元素指数具有明显的负相关关系。多样性指数  $H'$  与 Pb、As 重金属元素指数具有负相关关系。

## 参 考 文 献

- ALI H, KHAN E, ILAHI I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, 2019(1): 1-14
- ANGON P B, ISLAM M S, KC S, *et al*. Sources, effects and present perspectives of heavy metals contamination: Soil,

- plants and human food chain. *Heliyon*, 2024, 10(7): e28357
- ARFAEINIA H, DOBARADARAN S, MORADI M, *et al.* The effect of land use configurations on concentration, spatial distribution, and ecological risk of heavy metals in coastal sediments of northern part along the Persian Gulf. *Science of the Total Environment*, 2019, 653: 783–791
- ARMITAGE P D, MOSS D, WRIGHT J F, *et al.* The performance of a new biological water quality score system based on macroinvertebrates over a wide range of unpolluted running-water sites. *Journal of the Korean Society of Environmental Engineering*, 1983, 5(1): 99
- CHEN B B, HU R Q, CHEN M D. The natural background-values of environmental elements in the beach soils of Jiangsu Province. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1985, 30(3): 54–60 [陈邦本, 胡蓉卿, 陈铭达. 江苏海涂土壤环境元素的自然背景值. *南京农业大学学报*, 1985, 30(3): 54–60]
- DAI Q, LI S, ZHOU Z L, *et al.* Characteristics of zoobenthos community and potential ecological risk of heavy metals in urban rivers in Shanghai. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(10): 1985–1992 [戴奇, 李双, 周忠良, 等. 上海城区河道底栖动物群落特征与沉积物重金属潜在生态风险. *生态学杂志*, 2010, 29(10): 1985–1992]
- DI G M V, GORETTI E, TAMANTII V. Macrobenthos in Montedoglio Reservoir, Central Italy. *Hydrobiologia*, 1996, 321(1): 17–28
- DING J K, ZHANG W W, LI Y. Health assessment of the benthic ecosystem in Jiaozhou Bay: Ecological characteristics of the macrobenthos. *Progress in Fishery Sciences*, 2020, 41(2): 20–26 [丁敬坤, 张雯雯, 李阳, 等. 胶州湾底栖生态系统健康评价——基于大型底栖动物生态学特征. *渔业科学进展*, 2020, 41(2): 20–26]
- GENG N, XIA Y, LI D, *et al.* Migration and transformation of heavy metal and its fate in intertidal sediments: A review. *Processes*, 2024, 12(2): 311
- HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Water Research*, 1980, 14(8): 975–1001
- HUANG H R, PANG X Z. Heavy metals in sediments of tidal zone from south-west Bohai Sea. *Marine Sciences*, 1992(5): 44–47 [黄华瑞, 庞学忠. 渤海西南部潮间带沉积物中的重金属. *海洋科学*, 1992(5): 44–47]
- HUANG R Q, ZHAO Y F, LIU Q, *et al.* Grain size characteristics and environmental significance of surface sediments in the coastal areas of Rudong in Jiangsu Province, China. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science)*, 2020, 43(1): 91–99 [黄润秋, 赵一飞, 刘晴, 等. 江苏如东近岸海域表层沉积物粒度特征及其环境意义. *南京师大学报(自然科学版)*, 2020, 43(1): 91–99]
- JIAO L, QI P S, GONG K Y, *et al.* Impacting factors of heavy metal release from sediments of Songhua River. *Environmental Protection Science*, 2016, 42(2): 85–89, 102 [焦龙, 祁佩时, 宫凯悦, 等. 松花江底泥沉积物中重金属释放影响因素的研究. *环境保护科学*, 2016, 42(2): 85–89, 102]
- LI B Y, GAO Y, WANG Y H, *et al.* Research progress on the effects of heavy metal on farmland arthropods. *Hunan Agricultural Sciences*, 2019, 49(5): 118–122 [李博雅, 高颖, 王雨卉, 等. 重金属对农田节肢动物的影响研究进展. *湖南农业科学*, 2019, 49(5): 118–122]
- LI L Q, WANG C M, ZHANG Y, *et al.* Study of macrozoobenthos and heavy metals of surface sediment in Dongting Lake. *Ecology and Environment Sciences*, 2016, 25(2): 286–291 [李利强, 王丑明, 张屹, 等. 洞庭湖大型底栖动物与表层沉积物重金属研究. *生态环境学报*, 2016, 25(2): 286–291]
- LI L, WANG Y L, JIANG M, *et al.* Analysis of the source, potential biological toxicity of heavy metals in the surface sediments from shellfish culture mudflats of Rudong County, Jiangsu Province. *Environmental Science*, 2012, 33(8): 2607–2613 [李磊, 王云龙, 蒋玫, 等. 江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性. *环境科学*, 2012, 33(8): 2607–2613]
- LI Q S, CHU B, SHI L, *et al.* Heavy metal distribution in tidal wetland soils and its effect on reclamation in the Pearl River Estuary. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1422–1426 [李取生, 楚蓓, 石雷, 等. 珠江口滩涂湿地土壤重金属分布及其对围垦的影响. *农业环境科学学报*, 2007, 26(4): 1422–1426]
- LI Y M, MA J H, LIU D X, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of urban soils in Kaifeng City, China. *Environmental Science*, 2015, 36(3): 1037–1044 [李一蒙, 马建华, 刘德新, 等. 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价. *环境科学*, 2015, 36(3): 1037–1044]
- LIAO Y. Environment quality assessment of the shellfish culture area at Rudong, Jiangsu Province. Master's Thesis of Shanghai Ocean University, 2012 [廖勇. 江苏如东贝类养殖区环境质量评价. 上海海洋大学硕士研究生学位论文, 2012]
- LIN H, LAN W, FENG Q, *et al.* Pollution and ecological risk assessment, and source identification of heavy metals in sediment from the Beibu Gulf, South China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 168: 112403
- LIU R J, PU L J, ZHU M, *et al.* Spatio-temporal evolution and influence mechanism of shorelines and tidal flat reclamation during 2000–2020 in Rudong, Jiangsu Province. *Geographical Research*, 2021, 40(8): 2367–2379 [刘荣娟, 濮励杰, 朱明, 等. 2000–2020年江苏省如东海岸线与滩涂围垦时空演变及影响机制. *地理研究*, 2021, 40(8): 2367–2379]
- LIU S S, ZHANG Y, GONG S Y, *et al.* Distribution pattern of heavy metals in the surface sediments and environment quality evaluation for the Yangtze River deltaic economic zone. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(5):

- 63–71 [刘珊珊, 张勇, 龚淑云, 等. 长江三角洲经济区海域沉积物重金属分布特征及环境质量评价. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(5): 63–71]
- LIU X J, GAO S, WANG Y P. Modeling channel scour associated with shore-attached tidal ridges: A case study from Rudong coast, Jiangsu Province. *Marine Science Bulletin*, 2010, 29(3): 271–276 [刘秀娟, 高抒, 汪亚平. 倚岸型潮流脊体系中的深槽冲刷——以江苏如东海岸为例. 海洋通报, 2010, 29(3): 271–276]
- LIU X X, SANG G Q, WANG H J, *et al.* Community structure and main environmental factors of macrozoobenthos in the Weishan Lake. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 2022, 36(3): 330–337 [刘小雪, 桑国庆, 王海军, 等. 微山湖大型底栖动物群落结构及主要环境因子. 济南大学学报(自然科学版), 2022, 36(3): 330–337]
- LU J, YUAN F. The distribution of heavy metals in the sediment of low tidal flat, eastern Chongming Island, China. *IOP conference series. Materials Science and Engineering*, 2019, 472(1): 12091
- LUO K, LI L, LONG G Y, *et al.* Heavy metal pollution and their ecological risk assessment in sediments from southern Hainan Island. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2017 26(1): 85–93 [罗昆, 李亮, 龙根元, 等. 海南岛南部海域沉积物重金属污染及潜在生态风险评价. 上海海洋大学学报, 2017, 26(1): 85–93]
- LUO M B, SHEN X Q, XU Z L, *et al.* Study on intertidal macrobenthos in North Branch of Changjiang Estuary. *Marine Environmental Science*, 2006(4): 43–47 [罗民波, 沈新强, 徐兆礼, 等. 长江口北支水域潮间带大型底栖动物研究. 海洋环境科学, 2006(4): 43–47]
- SAEEDI M, HOSSEINZADEH M, JAMSHIDI A, *et al.* Assessment of heavy metals contamination and leaching characteristics in highway side soils, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 151(1/2/3/4): 231–241
- TANG J, ZHANG J, REN L, *et al.* Diagnosis of soil contamination using microbiological indices: A review on heavy metal pollution. *Journal of Environmental Management*, 2019, 242: 121–130
- TIAN W L. Study on community composition and heavy metal stress of lake benthos in Wuhan. Master's Thesis of South-Central Minzu University, 2022 [田文龙. 武汉市湖泊底栖动物群落组成及重金属胁迫研究. 中南民族大学硕士研究生学位论文, 2022]
- WANG S, WANG W, CHEN J, *et al.* Geochemical baseline establishment and pollution source determination of heavy metals in lake sediments: A case study in Lihu Lake, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 978–986
- WANG X, SU P, LIN Q, *et al.* Distribution, assessment and coupling relationship of heavy metals and macroinvertebrates in sediments of the Weihe River Basin. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 50: 101665
- WU B. An integrated marine sediment quality assessment framework based on the coupling relationships between benthic community alterations and toxic metals. Doctoral Dissertation of Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2014 [吴斌. 基于重金属与底栖生物群落结构耦合关系的近海沉积物环境质量综合评价体系构建. 中国科学院研究生院(海洋研究所)博士研究生学位论文, 2014]
- WU S, YANG H, GUO F, *et al.* Spatial patterns and origins of heavy metals in Sheyang River catchment in Jiangsu, China based on geographically weighted regression. *Science of the Total Environment*, 2017, 580: 1518–1529
- XU L L, MA C A, TIAN W, *et al.* The distribution of heavy metals in surface sediment of Lake Dianshan and its correlations with macrozoobenthos. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(10): 2223–2232 [徐霖林, 马长安, 田伟, 等. 淀山湖沉积物重金属分布特征及其与底栖动物的关系. 环境科学学报, 2011, 31(10): 2223–2232]
- XU Y, JIANG T, YANG Q, *et al.* Distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals in the surface sediments of the central region of the Bohai Sea during the summer. *Progress in Fishery Sciences*, 2019, 40(5): 52–61 [徐勇, 江涛, 杨茜, 等. 夏季渤海中部表层沉积物重金属空间分布及污染评价. 渔业科学进展, 2019, 40(5): 52–61]
- YANG L, CAI L Z, TONG Y G, *et al.* Heavy metal contents on Futian tidal flat in Shenzhen Bay and their effect on macrobenthos. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2005, 24(2): 157–164 [杨丽, 蔡立哲, 童玉贵, 等. 深圳湾福田潮滩重金属含量及对大型底栖动物的影响. 台湾海峡, 2005, 24(2): 157–164]
- ZHAN W Y, WANG N P, YE H, *et al.* Study on the cause of death of *Meretrix meretrix* in large area in Rudong, Jiangsu. *Marine Fisheries Research*, 2003, 24(4): 62–65 [詹文毅, 王南平, 叶辉, 等. 江苏如东文蛤大面积死亡原因探究. 海洋水产研究, 2003, 24(4): 62–65]
- ZHANG H, LIU P T, TANG J H, *et al.* Intertidal macrobenthos in large marine sewage waters in Nantong. *Fisheries Science*, 2009, 28(7): 409–412 [张虎, 刘培廷, 汤建华, 等. 南通市大型海洋排污海区潮间带底栖生物研究. 水产科学, 2009, 28(7): 409–412]
- ZHANG H, TANG H X, GUO Z R, *et al.* Temporal and spatial distribution of benthic macrofauna in intertidal mudflat of central and southern Jiangsu coast. *Marine Fisheries*, 2014, 36(3): 208–215 [张虎, 汤晓鸿, 郭仲仁, 等. 江苏中南部潮间带大型底栖动物时空分布特征. 海洋渔业, 2014, 36(3): 208–215]
- ZHANG L T, YANG L S, LI H R, *et al.* Analysis on the risks of heavy metals in coastal soils of Jiangsu Province. *Environmental Monitoring in China*, 2023, 39(2): 55–64 [张蓝天, 杨林生, 李海蓉, 等. 江苏沿海滩涂土壤重金属风险分析. 中国环境监测, 2023, 39(2): 55–64]
- ZHANG Y, LIU Y J, ZHANG Y, *et al.* Ecological characteristics of benthic polychaete community and its responses to

- environmental change in Laizhou Bay, Shandong Province of East China. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(4): 888–895 [张莹, 刘元进, 张英, 等. 莱州湾多毛类底栖动物生态特征及其对环境变化的响应. *生态学杂志*, 2012, 31(4): 888–895]
- ZHAO M, WANG E, XIA P, *et al.* Distribution and pollution assessment of heavy metals in the intertidal zone environments of typical sea areas in China. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 138: 397–406
- ZHOU C F, JIAO X M, DONG B J, *et al.* Distributions and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of the tidal flat coastal areas in Rudong. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2022, 14(2): 25–31 [周超凡, 矫新明, 董冰洁, 等. 如东滩涂近岸海域沉积物重金属分布特征及风险评价. *环境监控与预警*, 2022, 14(2): 25–31]
- ZHOU X, LIU Q, WU H. Distribution characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals in coastal sediments of Qidong, Jiangsu Province. *Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology)*, 2023, 23(2): 62–68 [周翔, 刘晴, 吴痕. 江苏启东近岸海域沉积物重金属分布特征及其潜在生态风险评价. *南京师范大学学报(工程技术版)*, 2023, 23(2): 62–68]

(编辑 冯小花)

## Distribution Characteristics of Heavy Metals in Sediments and Their Relationship with Benthic Fauna in the Clam Mudflat Aquaculture Area of Rudong, Jiangsu Province, China

HU Haopeng<sup>1,2</sup>, LI Lei<sup>2</sup>, TIAN Wei<sup>2</sup>, HAN Shuai<sup>1,2</sup>, WANG Fengbiao<sup>2</sup>, JIANG Mei<sup>2①</sup>

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China)

**Abstract** Mudflats, located at the land-sea interface, are extremely rich in ecological resources. They are an important spatial carrier for human survival and development and are notably influenced by human activities. The rapid social and economic development of coastal areas has led to increased pollutants being discharged into the coastal waters with water flow, which seriously affects the coastal aquatic ecological environment. Sediment is the sink for most pollutants, including nutrients, heavy metals, and organic compounds. Pollutants can be enriched in sediments through physical changes such as adsorption, accumulation, and precipitation. When the water environment conditions change, the pollutants in sediments are released into the overlying water, affecting the aquatic ecosystem's health. Biological activities destroy the physical structure of the sediment-water micro-interface, change the oxygen content at the interface, induce the movement of sediment particles, bring the interstitial water out of the sediment interface, and promote the release of heavy metals in the sediments. Heavy metal pollutants are inherently toxic, persistent, and difficult to degrade, leading to many serious environmental problems and posing significant health risks. Therefore, evaluating the risk of heavy metal pollution in surface sediments as an important reservoir of heavy metal pollutants is necessary. This provides a scientific basis for the ecological management and restoration of mudflats. Presently, most studies on heavy metal pollution in the sediments of Rudong mudflats focus on the source of heavy metal elements and the evaluation of biotoxicity. Studies on the correlation analysis of the distribution characteristics of heavy metals in the Rudong mudflats and the distribution characteristics of benthic animals in the Rudong mudflats are scarce.

In this study, the distribution characteristics of seven heavy metal elements in the sediments of the

① Corresponding author: JIANG Mei, Email: jiangrose73@163.com

Rudong *Meretrix meretrix* aquaculture area were analyzed, and the potential ecological risk index method was used to evaluate the environmental risk of heavy metals in the sediments of the aquaculture area. Meanwhile, the correlation analysis between the distribution of zoobenthos and heavy metal pollution was performed to provide a reference for the ecological environment of the *M. meretrix* mudflats in Rudong and the sustainable development of the clam mudflat resources. Four field surveys were conducted in September and December 2022 and April and July 2023 in the *M. meretrix* mudflat aquaculture area in Rudong, Jiangsu Province. The contents of Zn, Cr, Cu, Pb, As, Hg, and Cd in the surface sediments were determined, and the characteristics of benthic communities were analyzed. The pollution risk assessment of heavy metals in surface sediments was conducted using the potential ecological index method, and the response relationship between heavy metal pollution in sediments and the distribution of benthic animals was analyzed. The results showed that the average contents of heavy metals in the surface sediments were in the order of Cr>Zn>Pb>Cu>As>Cd>Hg, and the contents of Zn, Cu, Pb, As, Hg, and Cd were in accordance with the quality standard of one type of marine sediments. The highest value and summer average value of Cr exceeded the first-class standard of marine sediment quality and met the second-class standard of marine sediment quality. The annual comprehensive potential ecological risk index ranged from 90.49 to 145.78, averaging 110.68. Regarding the classification of potential ecological risk, the overall risk level of the *M. meretrix* aquaculture area was at the medium risk level, and the order of individual potential ecological risk of each heavy metal element was Cd>Hg>As>Pb>Cu>Cr>Zn. The ecological risks of each sampling station were mainly from Cd, Hg, and As. Sampling was performed four times. The heavy metal Cd was the primary contributor to potential ecological risk and sediment pollution in the Rudong mudflats. Cd, Hg, and Cu are important components of industrial sewage discharge, and the land-based inputs and other pathways are their main sources. As is uncommon in natural environments, it is a primary component of chemical fertilizers and pesticides. The use of pesticides in the mudflat shellfish aquaculture area may be the main source of the As pollution. Most of the Pb in the sediments originates from atmospheric deposition and is linked to the pollution emission of fishing ports and ships in the region. Zn is related to the zinc plating and machinery manufacturing industries, while Cr is applied in large quantities in the chemical and chromium-plating industries. A total of 68 species of macrobenthos were collected in the four samplings. The richness index  $d$  ranged from 0.74 to 5.01 (SD=±1.19), the evenness index  $J'$  ranged from 0.25 to 0.92 (SD=±0.15), and the diversity index  $H'$  ranged from 0.99 to 3.79 (SD=±0.65) at each sampling station. The mean values of the diversity index  $H'$  for spring, summer, autumn, and winter were between 2 and 3, respectively. Compared with the biodiversity index evaluation criteria, the biodiversity of the four seasons belonged to a relatively rich level, and the habitat level was at a 'general' level. The density of polychaetes in the benthic animals had a significant negative correlation with Cu, Pb, Cr, and Cd heavy metal element index and  $RI$ . A significant negative correlation existed between the benthic animal richness index  $d$  and the heavy metal element indexes of Pb, Cr, and As.

**Key words** Sediments; Heavy metals; Benthic fauna; Ecological risk index