

# 桑沟湾沉积物中重金属的污染特征及潜在生态风险评价

王旭茹<sup>1,2</sup>, 隋琪<sup>2,3</sup>, 赵信国<sup>2,3</sup>, 夏斌<sup>2,3</sup>,  
陈碧鹃<sup>2,3</sup>, 曲克明<sup>2</sup>

(1.上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306; 2.中国水产科学研究院黄海水产研究所, 山东 青岛 266071; 3.青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋生态与环境科学功能实验室, 山东 青岛 266237)

**摘要:**为了研究桑沟湾表层沉积物中重金属的污染特征及潜在生态风险, 本文分析了该区域 2019 年夏季、秋季和冬季 21 个站位表层沉积物中重金属 (Cu、Zn、Pb) 的含量和分布特征, 并采用 Hankanson 潜在生态危害指数法对桑沟湾不同季节表层沉积物中重金属的生态风险进行评估。结果表明, 三个季节桑沟湾表层沉积物中 Cu、Pb、Zn 的含量均符合沉积物质量一类标准。根据平均污染系数判断, 三个季节该区域表层沉积物中 Cu、Pb、Zn 的污染程度相似, 从高到低依次为 Zn、Pb、Cu。同时, 不同季节三种重金属的区域分布也存在一定的差异, 这可能是由多种环境因素共同导致的, 且该区域表层沉积物中这三种重金属的主要来源可能是陆源输入。潜在的生态风险评价结果表明, 该区域整体处于轻微生态风险等级, 三种重金属对桑沟湾养殖区潜在生态危害的贡献为 Pb>Cu>Zn, 其中, Pb 为首要的潜在生态风险因子。

**关键词:** 重金属; 分布特征; 风险评价; 桑沟湾

中图分类号: X132; X820.4

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2022)03-0365-07

## Distribution characteristics and potential risk assessment of heavy metals in sediments from Sanggou bay, China

WANG Xu-ru<sup>1,2</sup>, SUI Qi<sup>2,3</sup>, ZHAO Xin-guo<sup>2,3</sup>, XIA Bin<sup>2,3</sup>,  
CHEN Bi-juan<sup>2,3</sup>, QU Ke-ming<sup>2</sup>

(1.College of Marine Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2.Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China; 3.Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

**Abstract:** To understand the pollution status and potential ecological risks of heavy metals in surface sediments of Sanggou bay, the contents and enrichment of heavy metals (Cu, Zn, Pb) in surface sediments of 21 stations in three seasons (summer, autumn and winter) in 2019 were investigated. At the same time, the potential ecological risk index method presented by Lars Hankanson was used to evaluate the ecological hazards of heavy metals in the surface sediment of Sanggou bay in different seasons. The results show the contents of heavy metals Cu, Pb and Zn in the surface sediment of Sanggou bay in three seasons are following the standard value of the first-class in China Marine Sediment Quality Standard. According to the increasing average

收稿日期: 2020-12-29, 修订日期: 2021-05-21

基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项(2018YFD0900703); 中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2020TD12)

作者简介: 王旭茹(1994—), 女, 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要从事近海污染物生态风险相关研究, E-mail: 17854221827@163.com

通讯作者: 夏斌, 研究员, E-mail: xiabin@ysfri.ac.cn

coefficients, the pollution degree of Cu, Pb and Zn in the surface sediments of this area was similar in three seasons, and the order from high to low was Zn, Pb, Cu. Meanwhile, there are some differences in the regional distribution of the three heavy metals in different seasons, which may be caused by various environmental factors. Terrigenous input of pollutant is the main source of these three heavy metals in the surface sediments of this region. The results of potential ecological risk assessment showed the region as a whole was in a slight ecological risk grade. And the potential ecological risk of the heavy metals in Sanggou bay was in the following order:  $Pb > Cu > Zn$ . Thus, Pb was the primary potential ecological risk factor.

**Key words:** heavy metals; distribution characteristics; risk assessment; Sanggou bay

自然界中的大部分重金属是不可降解的有毒物质,也因其高毒性、持久性和生物富集性等特点而被列入海洋环境污染评价中。目前,海洋中常见的重金属污染物主要包括铜(Cu)、锌(Zn)、铅(Pb)、镉(Cd)、汞(Hg)和砷(As)六种,其中,Cu、Zn、Pb的污染最广,超过90%的水体和沉积物的重金属风险评价中均涉及这三种重金属<sup>[1]</sup>。有研究表明,Cu<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>会引发七带石斑鱼胚胎畸形,如胚尾芽弯曲等<sup>[2]</sup>,且会在不同程度上抑制半滑舌鳎胚胎孵化率,并造成胚胎尾部弯曲等畸形<sup>[3]</sup>;高浓度Cu会抑制大型藻江篱的生长,甚至导致其死亡<sup>[4]</sup>;Cu、Zn、Pb能够引起栉孔扇贝胚胎发育迟缓和畸形<sup>[5]</sup>。此外,海洋沉积物中重金属的含量比水体高3个数量级左右,且沉积物中的重金属会再次释放到海水中,造成二次污染<sup>[6-7]</sup>。因此,开展海洋沉积物中重金属的污染现状研究至关重要。

目前常用的评价方法主要包括沉积物富集系数法、地累积指数法、潜在生态风险指数法、沉积物质量基准法、尼梅罗综合指数法、污染负荷指数法和次生相与原生相比值法<sup>[8]</sup>等。在风险评估中,选择合适的方法至关重要,本次调查的研究对象是近海沉积物中的重金属,目标是评价该区域不同时间重金属的污染状况,Hankanson潜在生态风险指数法是基于水体沉积学理论的一种生态风险评价方法,可以反映不同污染物的污染状况以及多种污染物的综合影响。桑沟湾作为我国北方重要的养殖基地,目前的研究主要针对单个重金属的含量分布及污染状况<sup>[9-11]</sup>,但是关于桑沟湾不同季节沉积物中重金属分布特征及潜在风险评价的研究还很少。因此,本文以桑沟湾为研究区域,分析了该区域2019年夏季、秋季和冬季21个站位表层沉积物中重金属(Cu、

Zn、Pb)的含量和分布特征,采用Hankanson潜在生态风险指数法对不同季节桑沟湾表层沉积物中重金属的生态风险进行了评价,研究结果可为海洋渔业环境的综合评价与管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

桑沟湾位于山东半岛东端(37°01'N—37°09'N, 122°24'E—122°35'E),属于半封闭式港湾,东面与黄海相连,其余三面环陆。其湾口宽约11.5 km,海湾面积163.20 km<sup>2</sup>,湾内水域面积133.33 km<sup>2</sup>,最大水深为15 m,平均水深约为7.5 m,入湾的河流主要有桑沟河、沽河和崖头河<sup>[12]</sup>。桑沟湾是我国重要的半封闭型规模化海水养殖示范区,自湾内向湾外依次为贝类养殖区、鱼贝混养区、贝藻混养区以及藻类养殖区,养殖面积占全湾的70%以上,年产量约为24万吨<sup>[13]</sup>。

### 1.2 站位设置

本次调查时间为夏季(2019年7月23日—7月24日)、秋季(2019年10月23日—10月24日)和冬季(2019年12月28日—12月29日),在桑沟湾及其附近海域共布设21个站位采集表层沉积物样品(图1)。由于天气原因,夏季和冬季在D4站位未采集到沉积物样品。

### 1.3 样品采集和分析

使用抓斗式采泥器采集表层沉积物,放入双层聚乙烯袋中,保存在装有冰袋的保温箱中,带回实验室立即冷冻保存。分析样品时,将样品解冻混匀,在烘箱中60℃烘48 h至全部干燥,研磨后过80目筛,封存于双层聚乙烯袋中置于干燥器中备用。Cu、Zn、Pb含量均采用火焰原子吸收分光光度法测定,方法参照《海洋监测规范第5部分:沉积物分析》(GB17378.5—2007)<sup>[14]</sup>。

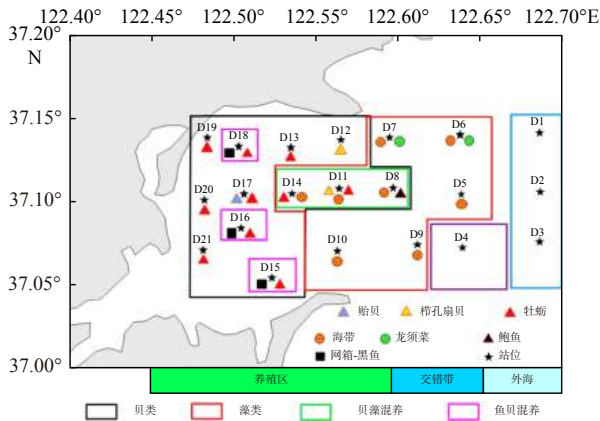


图1 桑沟湾表层沉积物采样站位

Fig. 1 Sampling locations in surface sediments of Sanggou bay

#### 1.4 潜在生态风险评价指数 (RI) 法

本研究采用 Hankanson 潜在生态风险评价指数法进行重金属污染风险评估,该方法考虑了区域的背景值、毒性因子和评价区域对重金属污染的敏感性等因素,可以反映不同污染物的污染状况和多种污染物的综合影响。该方法中的污染系数和生态风险指数  $RI$  的划分是基于 8 个参数,与本研究的评价参数不同,因此,本研究采用的元素背景值、毒性响应系数和沉积物中重金属的潜在生态风险等级及其阈值参考了其他文献数据<sup>[15]</sup>。其中,沉积物中重金属  $i$  的单项潜在生态危害系数  $E_r^i$  及沉积物中多种重金属的综合指数  $RI$  的计算公式如下:

$$E_r^i = T_r^i C_f^i = \frac{T_r^i C_s^i}{C_n^i}$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i C_f^i = \sum_{i=1}^n \frac{T_r^i C_s^i}{C_n^i}$$

式中:  $C_f^i$  为重金属  $i$  的污染系数,即代表重金属的实测值与背景值之比;  $C_s^i$  为重金属  $i$  的实测浓度;  $C_n^i$  为重金属  $i$  的背景值;  $T_r^i$  为重金属  $i$  的毒性响应系数。其中, Cu、Zn、Pb 的背景值 ( $C_n^i$ ) 分别为 30 mg/L、80 mg/L、25 mg/L; Cu、Zn、Pb 的毒性响应系数 ( $T_r^i$ ) 分别为 5、1、5<sup>[15]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 桑沟湾表层沉积物中重金属的含量

如表 1 所示,夏季,桑沟湾表层沉积物中 Cu、Zn、Pb 的平均含量分别为 (12.91±4.19)mg/kg、

(82.25±6.96) mg/kg、(13.54±3.25) mg/kg, 其中, Cu、Zn、Pb 的最大值分别出现在藻类养殖区 (21.69 mg/kg)、贝类养殖区 (93.92 mg/kg) 和鱼贝混养区 (18.98 mg/kg)。秋季, Cu、Zn、Pb 的平均含量分别为 (13.37±2.65) mg/kg、(64.56±11.17) mg/kg、(18.27±8.96) mg/kg, 最大值均出现在藻类养殖区, 分别为 18.93 mg/kg、89.27 mg/kg、41.13 mg/kg。冬季, Cu、Zn、Pb 的平均含量分别为 (15.85±6.07) mg/kg、(67.70±17.67) mg/kg、(14.34±5.77) mg/kg, 其中, Cu、Pb 的最大值均出现在鱼贝混养区, 分别为 27.87 mg/kg 和 26.29 mg/kg, Zn 的最大值则出现在藻类养殖区 (122.0 mg/kg)。三种重金属含量均符合海洋沉积物质量一类标准, 这与孙丕喜等在桑沟湾的研究结果一致<sup>[12]</sup>。由于受到水动力作用、沉积物粒度和泥沙量等因素的影响, 不同湾口表层沉积物中重金属的含量及分布也有所不同。如杭州湾表层沉积物中 Cu、Pb 的平均含量处于相对较低的水平<sup>[16]</sup>; 湄洲湾北部海区部分站位表层沉积物中 Zn、Cr 含量符合海洋沉积物质量二类标准, 其余重金属含量 (Cu、Ni、Cd、Pb、As、Hg) 均符合一类标准<sup>[17]</sup>; 辽东湾葫芦岛附近海域、西南部六股河口东南部海域以及西部近岸海域表层沉积物中 Cu、Pb、Zn、Ni、As、Cd、Cr、Hg 的含量, 与我国近海沉积物中重金属平均含量比较, 处于中等水平<sup>[18]</sup>。

从重金属污染系数  $C_f^i$  来看, 三个季节桑沟湾表层沉积物中 Cu、Pb 的平均污染系数均小于 1, 表明桑沟湾表层沉积物在这三个季节均未受到 Cu、Pb 的污染。而夏季重金属 Zn 的平均污染系数大于 1, 为 1.03, 最大污染系数为 1.17, 有 10 个调查站位的污染系数大于 1。秋季和冬季 Zn 的污染程度也高于重金属 Cu 和 Pb, 其平均污染系数分别为 0.81 和 0.85, 最大污染系数分别是 1.12 和 1.53。三个季节的重金属污染程度相似, 由高到低依次为 Zn、Pb、Cu。部分调查站位存在 Zn、Pb 轻度污染, 而所有的调查站位均未出现 Cu 污染, 表明桑沟湾及其附近海域基本未受到 Cu、Zn、Pb 的污染, 这与其他养殖海湾重金属污染状况相似。如赵晨辉等采用 RAC (The Risk Assessment Code) 法分析三门湾表层沉积物中重金属含量分布, 发现 Zn、Pb、Cu 表现为低生

表 1 2019 年夏季、秋季和冬季桑沟湾表层沉积物中重金属的含量和污染系数

Tab.1 Contents and accumulating coefficients of heavy metal in surface sediments of Sanggou bay from July to December 2019

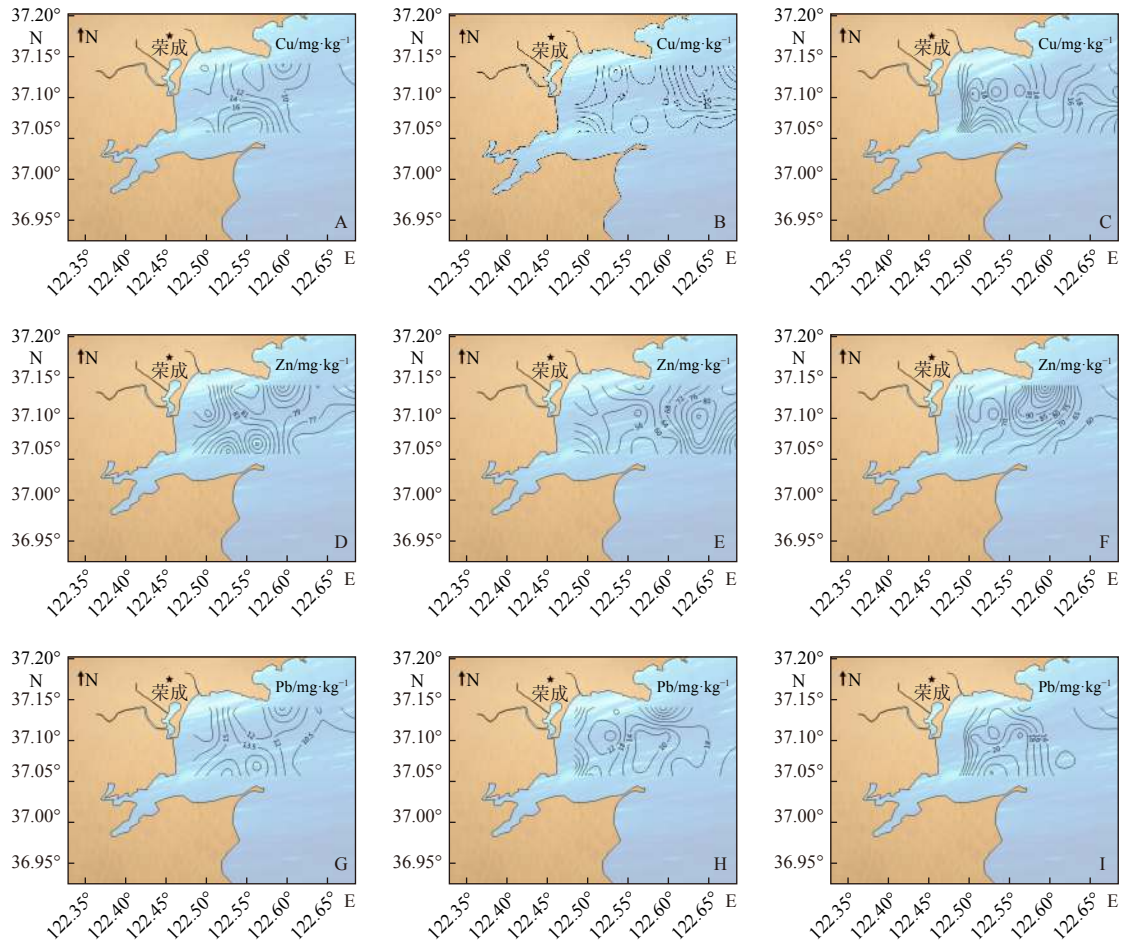
时间	区域	Cu		Zn		Pb	
		含量/mg·kg <sup>-1</sup>	污染系数	含量/mg·kg <sup>-1</sup>	污染系数	含量/mg·kg <sup>-1</sup>	污染系数
夏季	外海	10.59(9.52 ~ 11.66)	0.35(0.32 ~ 0.39)	78.42(73.45 ~ 83.40)	0.98(0.92 ~ 1.04)	11.69(9.93 ~ 13.45)	0.47(0.40 ~ 0.54)
	藻类	12.79(8.18 ~ 21.69)	0.43(0.27 ~ 0.72)	82.03(73.97 ~ 91.99)	1.03(0.93 ~ 1.15)	13.03(10.09 ~ 17.48)	0.52(0.40 ~ 0.70)
	贝藻	10.63(9.81 ~ 12.25)	0.35(0.33 ~ 0.41)	80.71(77.96 ~ 84.30)	1.01(0.97 ~ 1.05)	12.23(11.13 ~ 13.93)	0.49(0.45 ~ 0.56)
	贝类	12.78(9.29 ~ 16.09)	0.43(0.31 ~ 0.54)	84.14(76.65 ~ 93.92)	1.05(0.96 ~ 1.17)	14.71(10.86 ~ 18.86)	0.59(0.43 ~ 0.75)
	鱼贝	19.38(18.34 ~ 20.42)	0.65(0.61 ~ 0.68)	83.23(74.07 ~ 92.40)	1.04(0.93 ~ 1.16)	15.13(11.29 ~ 18.98)	0.61(0.45 ~ 0.76)
	交错带	-	-	-	-	-	-
	均值	12.91±4.19	0.43±0.14	82.25±6.96	1.03±0.09	13.54±3.25	0.54±0.13
秋季	外海	13.33(11.52 ~ 16.70)	0.44(0.38 ~ 0.56)	66.92(49.52 ~ 83.84)	0.84(0.62 ~ 1.05)	22.36(20.62 ~ 25.39)	0.89(0.82 ~ 1.02)
	藻类	15.00(12.00 ~ 18.93)	0.50(0.40 ~ 0.63)	68.38(58.23 ~ 89.27)	0.85(0.73 ~ 1.12)	21.09(7.79 ~ 41.13)	0.84(0.31 ~ 1.65)
	贝藻	12.93(12.72 ~ 12.86)	0.43(0.42 ~ 0.44)	58.26(50.38 ~ 69.58)	0.73(0.63 ~ 0.87)	14.67(7.27 ~ 28.25)	0.59(0.29 ~ 1.13)
	贝类	13.05(10.33 ~ 17.18)	0.44(0.34 ~ 0.57)	63.61(55.38 ~ 72.42)	0.80(0.62 ~ 0.91)	16.15(2.92 ~ 27.46)	0.65(0.12 ~ 1.10)
	鱼贝	11.75(10.45 ~ 13.05)	0.39(0.35 ~ 0.44)	54.78(53.65 ~ 55.19)	0.68(0.67 ~ 0.70)	18.40(17.74 ~ 19.05)	0.74(0.71 ~ 0.76)
	交错带	12.00	0.40	83.36	1.04	17.22	0.69
	均值	13.37±2.65	0.45±0.09	64.56±11.17	0.81±0.14	18.27±8.96	0.73±0.36
冬季	外海	18.29(12.50 ~ 24.67)	0.61(0.42 ~ 0.82)	62.62(57.18 ~ 70.20)	0.78(0.72 ~ 0.88)	14.37(12.26 ~ 18.04)	0.57(0.49 ~ 0.72)
	藻类	14.05(11.48 ~ 18.76)	0.47(0.38 ~ 0.63)	75.15(59.69 ~ 122.0)	0.94(0.75 ~ 1.53)	14.72(11.44 ~ 21.78)	0.59(0.46 ~ 0.87)
	贝藻	14.08(10.86 ~ 19.44)	0.47(0.36 ~ 0.65)	78.86(55.30 ~ 93.43)	0.99(0.69 ~ 1.17)	16.57(12.58 ~ 22.69)	0.66(0.50 ~ 0.91)
	贝类	15.01(6.43 ~ 26.21)	0.50(0.21 ~ 0.87)	59.36(41.82 ~ 72.21)	0.74(0.52 ~ 0.90)	11.97(4.93 ~ 19.73)	0.48(0.20 ~ 0.79)
	鱼贝	22.27(16.67 ~ 27.87)	0.74(0.56 ~ 0.93)	69.16(65.72 ~ 72.60)	0.86(0.82 ~ 0.91)	18.30(10.32 ~ 26.29)	0.73(0.41 ~ 1.50)
	交错带	-	-	-	-	-	-
	均值	15.85±6.07	0.53±0.20	67.70±17.67	0.85±0.22	14.34±5.77	0.57±0.23

态风险<sup>[19]</sup>;王恩康等人发现兴化湾表层沉积物中 Cu、Pb、Zn、Hg、As、Cd、Cr 为清洁水平<sup>[7]</sup>;顾效源等利用不同的评价方法发现丁字湾海域表层沉积物中重金属(Cu、Pb、Zn 等)总体呈未污染-轻微污染的现状<sup>[20]</sup>。

## 2.2 桑沟湾表层沉积物中重金属的平面分布特征

如图 2 所示,夏季,三种重金属分布特征基本相似,均呈现从湾内向湾外逐渐减少的趋势。秋季,Cu 和 Pb 的分布呈现从湾中向两侧递增的趋势,其中,Cu 的高值区出现在湾中的东北方向靠近入海口的海域,这可能是因为湾口区的水面变宽后,在波浪的作用下沉积物中的重金属发生再悬浮,并随着海水的迁移作用将再悬浮的重金属输送到入海口处。冬季,Pb 的分布在湾内呈现从南向北递减的趋势,且湾外的含量低于湾内,而 Zn 的分布呈现从湾中向两侧递减的趋势,

Cu 的分布无明显规律,但湾内的 Cu 含量高于湾外,且湾内靠近岸边的区域等值线密集。总体而言,Cu、Zn、Pb 呈现从湾内向湾外逐渐降低的趋势,这可能与陆源输入有关。蒋增杰等在评估桑沟湾表层沉积物的生态风险时认为,重金属主要是受陆源输入的影响<sup>[15]</sup>;三门湾三面环陆,其表层沉积物中 Zn、Cd、Pb、Cr、Cu 五种重金属的含量分布趋势整体表现为湾内高于湾外<sup>[19]</sup>;杭州湾河口地区表层沉积物中 Pb、Zn、Cd 的分布规律也是从河段向入海口递减<sup>[16]</sup>;柴小平等利用主成分分析发现,陆源碎屑颗粒的输送对杭州湾及邻近海域表层沉积物中重金属的组成和分布产生重要影响<sup>[21]</sup>。不同季节桑沟湾表层沉积物中 Cu、Zn、Pb 的分布特征存在一定差异,季节变化明显。春、夏两季属于海带等藻类生长旺盛且即将成熟的季节,密集的养殖会使桑沟湾水交换



(其中, A、D 和 G 为夏季; B、E 和 H 为秋季; C、F 和 I 为冬季)

图 2 2019 年夏季、秋季和冬季桑沟湾表层沉积物重金属含量水平分布

Fig. 2 Horizontal distribution of heavy metals in surface sediments of Sanggou bay from July to December 2019

能力更弱。而秋、冬两季,一方面,海带等海产品收获后,湾内的水交换情况有所好转;另一方面,也有研究认为秋、冬季渤海南部沿岸流对湾内的影响高于春、夏季<sup>[9-10]</sup>,这些因素都会对桑沟湾表层沉积物中 Cu、Zn、Pb 的分布有一定影响。

### 2.3 重金属的潜在生态风险评价

从表 2 可以看出,三个季节调查的 3 种重金属的  $E_i^i$  值和  $RI$  值均小于其轻微生态危害的划分标准值,这表明桑沟湾表层沉积物中重金属的生态风险处于轻微状态。从区域上看,夏季, Cu 和 Pb 的  $E_i^i$  平均值为鱼贝混养区>贝类养殖区>藻类养殖区>贝藻混养区>外海海域, Zn 的  $E_i^i$  平均值为贝类养殖区>鱼贝混养区>藻类养殖区>贝藻混养区>外海海域,而  $RI$  平均值则为鱼贝混养区>贝类养殖区>藻类养殖区>贝藻混养区>外海海

域。但从整体分析,湾内各个重金属  $E_i^i$  平均值和  $RI$  平均值高于湾外,这说明湾内的污染程度高于湾外。秋季, Cu 的  $E_i^i$  平均值为藻类养殖区>外海海域>贝藻混养区>贝类养殖区>交错带>鱼贝混养区, Zn 的  $E_i^i$  平均值为贝类养殖区>交错带>藻类养殖区>外海海域>贝藻混养区>鱼贝混养区, Pb 的  $E_i^i$  平均值为外海海域>藻类养殖区>鱼贝混养区>交错带>贝类养殖区>贝藻混养区,而  $RI$  平均值则为藻类养殖区>外海海域>交错带>鱼贝混养区>贝类养殖区>贝藻混养区,这说明秋季 Cu 污染较为严重的区域是藻类养殖区, Zn 污染较为严重的区域是贝类养殖区,而 Pb 污染较为严重的区域是外海区域,且从  $RI$  可以看出,湾外的污染程度整体高于湾内。冬季, Cu 的  $E_i^i$  平均值为鱼贝混养区>外海海域>贝类养殖区>贝藻混养区>藻类养殖区, Zn 的  $E_i^i$  平均值为贝藻混养区>

表2 2019年夏季、秋季和冬季桑沟湾表层沉积物中重金属元素的潜在生态危害系数( $E_r^i$ )和危害指数( $RI$ )Tab.2 Potential ecological risk coefficients ( $E_r^i$ ) and risk indices ( $RI$ ) of heavy metal elements in surface sediments of Sanggou bay from July to December 2019

时间	区域	$E_r^i$			$RI$
		Cu	Zn	Pb	
夏季	外海	1.77(1.59 ~ 1.94)	0.98(0.92 ~ 1.04)	2.34(1.99 ~ 2.69)	5.08(4.49 ~ 5.68)
	藻类	2.13(1.36 ~ 3.62)	1.03(0.93 ~ 1.15)	2.61(2.02 ~ 3.50)	5.76(4.31 ~ 8.26)
	贝藻	1.77(1.64 ~ 2.04)	1.01(0.97 ~ 1.05)	2.45(2.23 ~ 2.79)	5.23(4.84 ~ 5.88)
	贝类	2.13(1.55 ~ 2.68)	1.05(0.96 ~ 1.17)	2.94(2.17 ~ 3.77)	6.12(4.68 ~ 7.63)
	鱼贝	3.23(3.06 ~ 3.40)	1.04(0.93 ~ 1.16)	3.03(2.26 ~ 3.80)	7.30(6.59 ~ 8.01)
	交错带	-	-	-	-
	均值	2.15	1.03	2.71	5.89
秋季	外海	2.22(1.92 ~ 2.78)	0.84(0.62 ~ 1.05)	4.47(4.13 ~ 5.08)	7.53(7.22 ~ 7.62)
	藻类	2.50(2.00 ~ 3.16)	0.85(0.73 ~ 1.12)	4.22(1.56 ~ 8.23)	7.57(4.27 ~ 11.26)
	贝藻	2.16(2.12 ~ 2.20)	0.73(0.63 ~ 0.87)	2.93(1.45 ~ 5.65)	5.82(4.20 ~ 8.55)
	贝类	2.18(1.57 ~ 2.86)	0.80(0.69 ~ 0.91)	3.23(0.59 ~ 5.49)	6.20(3.04 ~ 9.26)
	鱼贝	1.96(1.74 ~ 2.18)	0.68(0.67 ~ 0.70)	3.68(3.55 ~ 3.81)	6.32(6.25 ~ 6.40)
	交错带	2.00	1.04	3.44	6.49
	均值	2.23	0.81	3.65	6.69
冬季	外海	3.05(2.08 ~ 2.95)	0.78(0.72 ~ 0.88)	2.87(2.45 ~ 3.61)	6.71(5.29 ~ 7.45)
	藻类	2.34(1.91 ~ 3.13)	0.94(0.75 ~ 1.53)	2.94(2.29 ~ 4.36)	6.23(5.14 ~ 7.85)
	贝藻	2.35(1.81 ~ 3.24)	0.99(0.69 ~ 1.17)	3.31(2.52 ~ 4.54)	6.65(5.42 ~ 8.95)
	贝类	2.50(1.07 ~ 4.37)	0.74(0.52 ~ 0.90)	2.39(0.99 ~ 3.94)	5.64(2.72 ~ 9.15)
	鱼贝	3.71(2.78 ~ 4.65)	0.86(0.82 ~ 0.91)	3.66(2.06 ~ 5.26)	8.24(5.66 ~ 10.81)
	交错带	-	-	-	-
	均值	2.64	0.85	2.87	6.36

藻类养殖区>鱼贝混养区>外海海域>贝类养殖区, Pb的 $E_r^i$ 平均值为鱼贝混养区>贝藻混养区>藻类养殖区>外海海域>贝类养殖区, 而 $RI$ 平均值则为鱼贝混养区>外海海域>贝藻混养区>藻类养殖区>贝类养殖区, Cu、Zn、Pb污染较为严重的区域均属于养殖区, 鱼贝混养区重金属的污染程度略高于其他四个区域。崔毅等评估了5月和8月乳山湾表层沉积物的生态风险, 其Cu、Zn、Pb的 $E_r^i$ 平均值均低于夏季桑沟湾的 $E_r^i$ 平均值, 两个海湾均是北方重要的经济养殖基地, 其生态风险均表现为轻微<sup>[22]</sup>。

从季节变化分析, 夏、秋、冬三个季节的 $E_r^i$ 平均值由高到低依次为Pb、Cu、Zn, 其中, Pb的 $E_r^i$ 最大值约是Cu的1.63倍, Pb的 $E_r^i$ 最大值约是Zn的4.51倍, Pb的 $E_r^i$ 对 $RI$ 的影响程度大于重金属Zn和Cu, 这表明Pb对桑沟湾生态

环境潜在影响最大。本调查中桑沟湾表层沉积物中的重金属的 $E_r^i$ 平均值略高于蒋增杰等<sup>[15]</sup>的调查结果, 其中, 夏季Zn的 $E_r^i$ 平均值(1.03)是蒋增杰等<sup>[15]</sup>的Zn的 $E_r^i$ 平均值(0.58)的1.78倍, 秋季Pb的 $E_r^i$ 平均值(3.65)是后者Pb的 $E_r^i$ 平均值(2.36)的1.55倍, 冬季Cu的 $E_r^i$ 平均值(2.64)是后者Cu的 $E_r^i$ 平均值(2.14)的1.23倍, 表明近几年桑沟湾表层沉积物重金属的污染程度变化不大。总体而言, 重金属污染程度从高到低依次是Pb、Cu、Zn, 与蒋增杰等<sup>[15]</sup>的研究结果一致。从多个重金属的综合指数 $RI$ 来看, 三个季节的21个站位的 $RI$ 均小于110, 表明桑沟湾表层沉积物中重金属的生态风险轻微, 养殖环境良好, 这与蒋增杰等<sup>[15]</sup>在2006年对桑沟湾沉积物重金属的污染状况调查结果相似, 从 $RI$ 分析该区域表层沉积物重金属的生态风险均表现

为轻微状态。三个季节桑沟湾表层沉积物的生态风险程度为秋季>夏季>冬季,这可能与养殖活动相关<sup>[9]</sup>。作为与桑沟湾相邻的爱莲湾,其海域沉积物重金属的综合生态风险程度为中等,各重金属的潜在生态风险为 Cd>Hg>As>Pb>Cu>Cr>Zn, Cd 和 Hg 是主要的潜在生态风险因子<sup>[23]</sup>;而作为北方养殖海区的乳山湾,其生态风险表现为轻微,沉积物重金属的污染程度为 Cd>Hg>As>Pb>Cu>Zn,具有潜在影响的元素主要是 Cd<sup>[22]</sup>。因此,下一步我们将对桑沟湾的其他重金属的污染状况进行调查,以期更好地评估桑沟湾的重金属污染潜在风险。

### 3 结论

(1)2019年夏、秋、冬三个季节桑沟湾表层沉积物中 Cu、Zn、Pb 含量均符合海洋沉积物质量一类标准(GB18668—2002)。

(2)平均污染系数分析结果表明,桑沟湾三个季节的重金属污染程度相似,由高到低依次为 Zn、Pb、Cu。三个季节桑沟湾表层沉积物中三种重金属含量的空间分布差异明显,夏季, Zn、Pb、Cu 的分布呈现从湾内向湾外逐渐减少的变化趋势;秋季, Cu、Pb 的分布呈现从湾中向两侧递增的趋势;冬季,湾外 Pb 含量低于湾内, Zn 的分布呈现从湾中向两侧递减的趋势,而湾内 Cu 含量高于湾外,且湾内靠近岸边的区域等值线密集。

(3)潜在生态风险评价结果表明,桑沟湾表层沉积物 Cu、Zn、Pb 的潜在生态风险总体表现为轻度,三种重金属对桑沟湾养殖区的潜在生态危害程度为 Pb>Cu>Zn。其中, Pb 和 Cu 的  $E_r^i$  对 RI 的影响程度大于 Zn,对桑沟湾养殖区生态环境具有潜在影响的重金属主要是 Pb。

### 参考文献:

- [1] 陈明,蔡青云,徐慧,等.水体沉积物重金属污染风险评价研究进展[J].生态环境学报,2015,24(06):1069-1074.
- [2] 孔祥迪,陈超,李炎璐,等. Cu<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>对七带石斑鱼(*Epinephelus septemfasciatus*)胚胎和初孵仔鱼的毒性效应[J].渔业科学进展,2014,35(05):115-121.
- [3] 柳学周,徐永江,兰功刚.几种重金属离子对半滑舌鳎胚胎发育和仔稚鱼的毒性效应[J].海洋水产研究,2006(02):33-42.
- [4] 郭文清,陈浩如,李飞永,等.不同环境条件下重金属对江篱的毒性效应[J].海洋环境科学,1991(03):14-19.
- [5] 王远隆,杨晓岩.重金属(Zn、Pb、Cu、Cd)对栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)胚胎及幼体的毒性试验研究[J].烟台大学学报(自然科学与工程版),1990(01):45-51.
- [6] ZHENG B, LU S, WU J, et al. Heavy metal distribution in Tiaoxi River's sediment[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(3): 2603-2613.
- [7] 王恩康,丰爱平,张志卫,等.兴化湾海域水体和表层沉积物中重金属分布及其源解析[J].海洋科学进展,2019,37(04):696-708.
- [8] 范拴喜,甘卓亭,李美娟,等.土壤重金属污染评价方法进展[J].中国农学通报,2010,26(17):310-315.
- [9] 张国玲,任景玲,张继红,等.桑沟湾养殖区铝的分布及季节变化[J].海洋环境科学,2010,29(06):843-847.
- [10] 房瑞雪,任景玲,李磊,等.桑沟湾溶解态铝的分布、季节变化及影响因素[J].海洋科学进展,2015,33(03):342-351.
- [11] 张晓慧,李磊,任景玲,等.桑沟湾溶解态铁的分布、季节变化及影响因素[J].海洋环境科学,2019,38(05):656-662.
- [12] 孙丕喜,郝林华,杜蓓蓓,等.桑沟湾重金属对海洋环境影响和食用贝类的健康风险评估[J].海洋科学进展,2014,32(02):249-258.
- [13] 杨艳云.桑沟湾规模化养殖对底质环境的影响评价[D].大连:大连海洋大学,2018.
- [14] GB 17378.3—2007,海洋监测规范[S].
- [15] 蒋增杰,方建光,张继红,等.桑沟湾沉积物重金属含量分布及潜在生态危害评价[J].农业环境科学学报,2008,27(001):301-305.
- [16] 张弛,高效江,宋祖光,等.杭州湾河口地区表层沉积物中重金属的分布特征及污染评价[J].复旦学报(自然科学版),2008,47(4):535-540.
- [17] 吕利云,李兆河,董树刚,等.2010年湄洲湾北部海区表层沉积物中重金属的分布特征和污染评价[J].海洋湖沼通报,2019(3):60-68.
- [18] 蓝先洪,孟祥君,梅西,等.辽东湾表层沉积物的重金属污染特征与质量评价[J].海洋学报,2018,40(06):60-73.
- [19] 赵晨辉,胡信,刘小涯,等.浙江三门湾表层沉积物重金属含量分布、赋存形态及生态风险评价[J].海洋学研究,2018,36(02):64-73.
- [20] 顾效源,孔祥淮,王伟,等.山东丁字湾表层沉积物重金属分布及污染评价[J].海洋地质前沿,2019,35(03):13-21.
- [21] 柴小平,胡宝兰,魏娜,等.杭州湾及邻近海域表层沉积物重金属的分布、来源及评价[J].环境科学学报,2015,35(12):3906-3916.
- [22] 崔毅,幸福言,马绍赛,等.乳山湾沉积物重金属污染及其生态危害评价[J].中国水产科学,2005(01):83-90.
- [23] 吴兴伟,徐艳东,付翔,等.山东荣成爱莲湾邻近海域表层沉积物重金属污染特征和潜在生态风险评价[J].科学与技术工程,2017,17(36):139-144.