

桑沟湾表层海水中重金属含量季节变化及污染分析

孙业皎^{1,2,3}, 黄翠玲⁴, 隋琪^{1,2,3}, 娄安刚¹, 夏斌^{2,3},
张旭志², 赵信国^{2,3}, 陈碧鹃^{2,3}, 曲克明²

(1.中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266003; 2.中国水产科学研究院 黄海水产研究所, 农业农村部 海洋渔业可持续发展重点实验室, 山东省渔业资源与生态环境重点实验室, 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 266071; 4.通标标准技术服务(青岛)有限公司, 山东 青岛 266101)

摘要:桑沟湾海域是我国重要的半封闭海湾规模化海水养殖示范区, 重金属是一类具有严重危害的污染物, 因此, 探明桑沟湾表层海水中重金属污染状况和季节变化规律, 对该区域的海水养殖活动和生态环境保护具有重要的参考意义。本研究在桑沟湾海域布设 21 个调查站位, 分别于 2019 年春季(4 月)、夏季(7 月)、秋季(10 月)、冬季(12 月)采集表层海水, 调查 Cu、Zn、Pb、Cd 4 种重金属的含量, 并分析了其季节变化规律、分布特征和污染程度。结果显示, 4 种重金属的含量范围($\mu\text{g/L}$)分别为 Cu (1.14~2.88)、Zn (4.62~6.53)、Pb (0.38~1.55)、Cd (0.18~0.92), 大致呈自西向东先递增后递减的趋势, 污染程度依次为 Zn<Cu<Cd<Pb, 并表现出一定的季节和养殖分区差异, 其中夏季和贝藻混养区相对较高。与国内其他养殖区相比, 桑沟湾表层海水中重金属含量较低, 整体上处于清洁水平, 符合国家一类海水水质标准, 适宜水产养殖。

关键词:桑沟湾; 养殖区; 重金属; 含量变化; 分布特征; 污染程度

中图分类号:X55 文献标识码:A 文章编号:1007-6336(2021)05-0752-08

Concentration variation and pollution assessment of heavy metals in surface seawater of Sanggou bay

SUN Ye-jiao^{1,2,3}, HUANG Cui-ling⁴, SUI Qi^{1,2,3}, LOU An-gang¹, XIA Bin^{2,3},
ZHANG Xu-zhi², ZHAO Xin-guo^{2,3}, CHEN Bi-juan^{2,3}, QU Ke-ming²

(1.College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2.Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Fishery Resources and Ecological Environment in Shandong Province, Qingdao 266071,China; 3.Marine Ecology and Environmental Science Laboratory, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071, China; 4.SGS-CSTC Standards Technical Services Co., Ltd. Qingdao Branch, Qingdao 266101, China)

Abstract: Sanggou bay is an important semi closed demonstration zone of large-scale mariculture in China. Heavy metals are a kind of pollutants, which are highly toxic to environment and organisms. It is, therefore, highly essential and urgent to investigate the pollution status and seasonal variation of heavy metals in the

收稿日期: 2021-02-02, 修订日期: 2021-03-26

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

作者简介: 孙业皎(1996-), 女, 山东烟台人, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋生态毒理学, E-mail: 21191011048@stu.ouc.edu.cn

通讯作者: 赵信国(1988-), 男, 山东菏泽人, 助理研究员, 主要研究方向为海洋生态毒理学, E-mail: zhaoxg@ysfri.ac.cn

surface seawater of Sanggou bay. It will make great contribution to mariculture activities and be ecologically important for the preservation of marine ecosystem in Sanggou bay. In this study, we thus collected surface seawater of 21 stations in spring (April), summer (July), autumn (October) and winter (December) in 2019, respectively. We then determined the concentrations of Cu, Zn, Pb and Cd in the surface seawater, and analyzed subsequently their seasonal variation, distribution characteristics and pollution degree. The results showed that the concentrations of Cu, Zn, Pb, Cd were in the range of 1.14 ~ 2.88 $\mu\text{g/L}$, 4.62 ~ 6.53 $\mu\text{g/L}$, 0.38 ~ 1.55 $\mu\text{g/L}$ and 0.18 ~ 0.92 $\mu\text{g/L}$, respectively. Generally, the concentration of the four heavy metals appeared to increase and then decrease from west to east of Sanggou bay. Single factor pollution indices showed that the order of the pollution degree of the four heavy metals was $\text{Zn} < \text{Cu} < \text{Cd} < \text{Pb}$. There were also seasonal variation and culture area differences of heavy metals concentration and pollution degree, leading to the higher level of the four heavy metals in summer and shellfish algae mixed culture area. However, the concentration and pollution degree of the four heavy metals in the surface seawater of Sanggou bay is approximately equal to and/or even much lower than those of many other mariculture areas in China. Overall, the level of the four heavy metals in the surface seawater of Sanggou bay is in the clean level and in line with the national first-class seawater quality standards. We therefore conclude that the seawater quality of Sanggou bay is very suitable for mariculture.

Key words: Sanggou bay; aquaculture area; heavy metals; content changes; distribution characteristics; pollution degree

重金属是一类毒性强、难降解、易在生物体内蓄积并对人类和环境有严重危害的污染物,可通过地表径流、沿海工农业废水和城市生活污水排放等途径汇入海洋。海洋中的重金属,可沿食物链转移,产生生物富集效应,进而对海洋生态环境造成更大的威胁。因此,海洋中的重金属污染状况成为研究者关注的热点。

桑沟湾位于山东省荣成市(37° 01' N—37° 09' N, 122° 24' E—122° 35' E),为半封闭海湾,北、西、南三面为陆地环抱,湾口朝东,通过宽 10 km 的湾口与黄海相连。湾内水域面积约 133 km²,滩涂面积 20 km²,平均水深 7 ~ 8 m,最大水深 15 ~ 17 m^[1]。桑沟湾海域自然环境良好,海底平坦,初级生产力高,水产资源丰富,是适宜发展水产养殖业的良好区域。桑沟湾滩涂养殖和浅海养殖业十分发达,为荣成市主要海产品基地和我国北方重要的半封闭型海湾规模化海水养殖示范区。因此,开展桑沟湾水环境重金属污染及生态影响评价对该区域养殖生产活动和生态环境保护具有双重价值。近年来,对于沉积物中的重金属含量及其生态风险分析研究较多^[2-6],而对表层海水,特别是按照不同养殖功能分区调查分析表层海水中重金属含量及污染状况则鲜有报道。本文采用单因子污染指数法,对桑沟湾表层海水中的铜(Cu)、锌(Zn)、铅(Pb)及镉(Cd)4种

重金属的含量分布及其污染特征进行了调查研究,并针对不同养殖功能分区进行了污染评价和来源分析,以了解桑沟湾表层海水中重金属的污染现状,以期改善地区养殖环境质量和水产养殖业的可持续发展提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 样品采样与分析

分别于 2019 年春季(4月)、夏季(7月)、秋季(10月)、冬季(12月)在桑沟湾海域布设 21 个调查站位(图 1),采集表层海水样品。其中,D1、D2、D3 属于外海海域,D4 属于过渡区,D5、D6、D7、D9、D10 属于藻类养殖区,D8、D11、D14 属于贝藻混养区,D12、D13、D15、D19、D20、D21 属于贝类养殖区,D16、D17、D18 属于鱼贝混养区。表层海水使用 Niskin 采水器采集,用 0.45 μm 滤膜过滤,然后用浓硝酸(pH<2)酸化,低温密封保存于聚乙烯瓶中再带回实验室分析。Cu、Zn、Pb、Cd 用原子吸收分光光度法测定,在做好标准曲线等优化条件下,对于 Cu、Pb、Cd,将海水 pH 调节到 5 ~ 6,对于 Zn,将海水 pH 调节到 3.5 ~ 4,然后与吡咯烷二硫代氨甲酸铵(APDC)和二乙氨基二硫代甲酸钠(DDTC)混合液螯合,经甲基异丁基酮(MIBK)-环己烷混合溶液萃取分离,于各自的特征波长下用原子吸收

分光光度计测定其吸收值,并设置空白组进行空白实验,计算样品中相应金属元素的浓度。表层海水样品的采集、现场处理、保存及检测均参照《海洋监测规范》(GB 17378.3-2007, GB 17378.4-2007)。

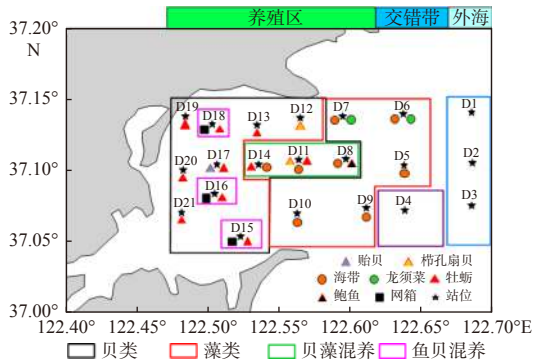


图1 采样站位

Fig. 1 Distribution of sampling stations

1.2 评价方法

以《海水水质标准》的一类海水水质标准作为评价标准,采用单因子污染指数法(P_i)评价桑沟湾表层海水中重金属的污染状况,评价等级参照贾晓平^[7]的海水污染状况等级划分(表1)。

表1 海水污染状况等级划分

Tab.1 Classification of seawater pollution status

P_i	污染水平	污染程度
$P_i < 0.4$	1	自然本底
$0.4 \leq P_i < 0.6$	2	清洁
$0.6 \leq P_i < 0.8$	3	较清洁
$0.8 \leq P_i < 1.0$	4	轻度污染
$1.0 \leq P_i < 2.0$	5	中度污染
$P_i \geq 2.0$	6	重度污染

单因子污染指数按照以下公式计算:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中: P_i 为水体中重金属的单因子污染指数(single factor pollution index),反映第*i*项重金属的污染程度; C_i 和 S_i 分别为重金属含量的实测值($\mu\text{g/L}$)和《海水水质标准》的一类重金属含量的限量值($\mu\text{g/L}$)。

1.3 数据分析

监测数据采用 Excel 2019 软件进行统计分

析,采用 SPSS 25 软件对数据进行相关性分析,采用 Surfur 13 软件绘制重金属含量平面分布图,采用 OriginPro 2017 软件绘制重金属含量柱状图。

2 结果与讨论

2.1 Cu、Zn、Pb、Cd 含量的季节变化

桑沟湾表层海水中重金属含量检测结果见图2,重金属含量存在季节性差异,Cu、Pb、Cd的平均含量依次是秋季<冬季<春季<夏季,Zn的平均含量依次是冬季<秋季<春季<夏季。4种重金属的平均含量均为夏季最高,这可能是由于夏季雨水较多,入海径流较大,致使陆源输入增大所致。总体来看,除个别站位在春季、夏季和秋季Pb含量介于《海水水质标准》中的一类标准和二类标准限量值之间外,其他站位表层海水中Cu、Zn、Pb、Cd含量均低于《海水水质标准》中的一类重金属含量的限量值($\mu\text{g/L}$)。

2.2 Cu、Zn、Pb、Cd 含量的平面分布

桑沟湾表层海水中Cu、Zn、Pb、Cd的平面分布如图3所示。Cu的平面分布大致呈自西向东先递减后递增再递减的趋势,在桑沟湾养殖区的东北部和过渡区的北部处形成一个高值区域,低值区出现在养殖区的西部及外海区域。Zn的平面分布大致呈自西向东先递减后递增再递减的趋势,自北向南呈递增趋势,在桑沟湾养殖区的中南部及过渡区南部形成一个高值区域,低值区出现在养殖区的西部及外海区域。Pb的平面分布以桑沟湾口(122.55°E)为分界线,左半部分大致呈自西北向东南呈递增的趋势,右半部分大致呈自西北向东南呈先递减后递增的趋势,在桑沟湾养殖区的东部及外海区域形成一个高值区域,低值区出现在养殖区的西北部以及过渡区的北部。Cd的平面分布大致呈自西向东先递增后递减再递增的趋势,自北向南呈递减趋势,在桑沟湾养殖区中北部及外海区域形成一个高值区域,低值区出现在养殖区的东部以及西南部区域。

桑沟湾表层海水不同养殖功能分区重金属含量如图4所示。整个调查区域中,Cu的浓度范围为1.14~2.88 $\mu\text{g/L}$,平均值为1.68 $\mu\text{g/L}$;Zn的

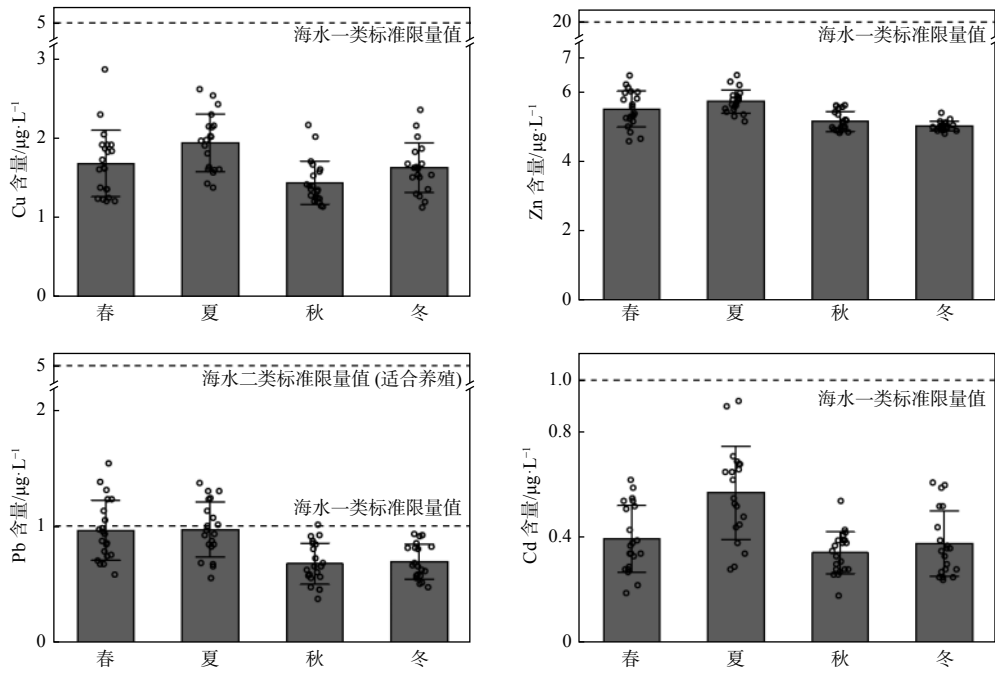


图 2 桑沟湾表层海水不同季节重金属含量(平均值±标准差)

Fig. 2 Seasonal variation of concentration of heavy metal in the surface seawater of the Sanggou bay (Mean±SD)

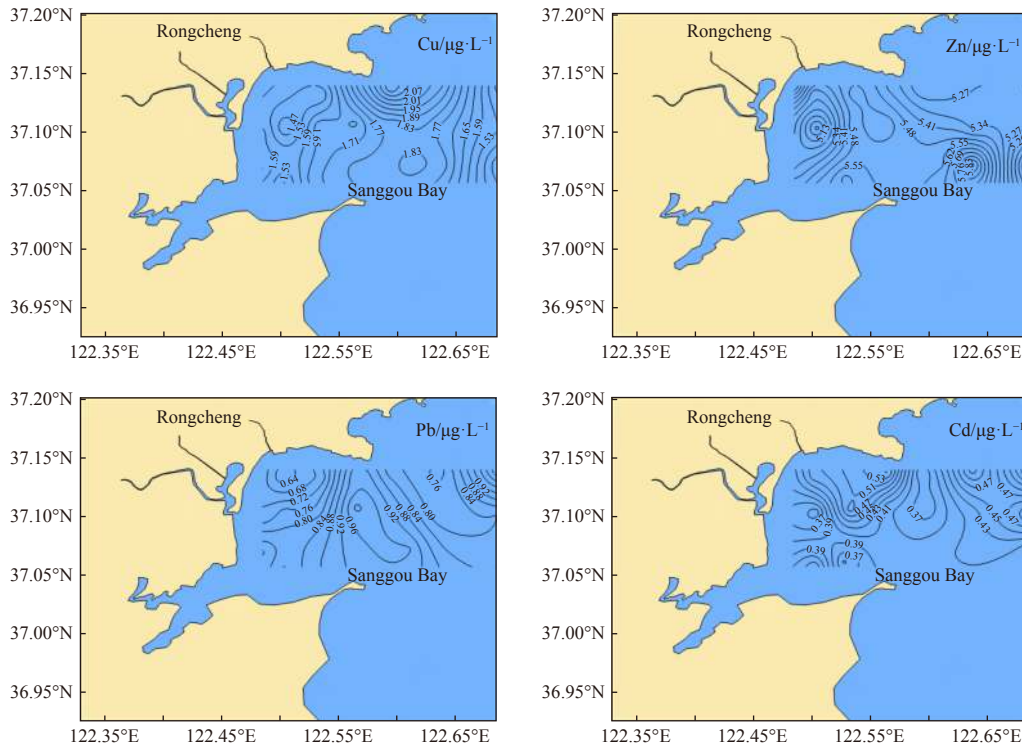


图 3 桑沟湾表层海水中 Cu、Zn、Pb、Cd 的平面分布

Fig. 3 Horizontal distribution of Cu, Zn, Pb, Cd in surface seawater of Sanggou bay

浓度范围为 4.62 ~ 6.53 $\mu\text{g}/\text{L}$, 平均值为 5.39 $\mu\text{g}/\text{L}$; Pb 的浓度范围为 0.38 ~ 1.55 $\mu\text{g}/\text{L}$, 平均值为 0.83 $\mu\text{g}/\text{L}$; Cd 的浓度范围为 0.18 ~ 0.92 $\mu\text{g}/\text{L}$, 平

均值为 0.42 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。从分区来看, Cu 的含量顺序是鱼贝混养<外海<贝类<贝藻混养<藻类; Zn 的含量顺序是鱼贝混养<外海<藻类<贝类<贝藻混

养; Pb的含量顺序是鱼贝混养<贝类<藻类<贝藻混养<外海海域; Cd的含量在所有分区分布比较

平均,其中,含量最大值依次是外海<贝藻混养<鱼贝混养<藻类<贝类。

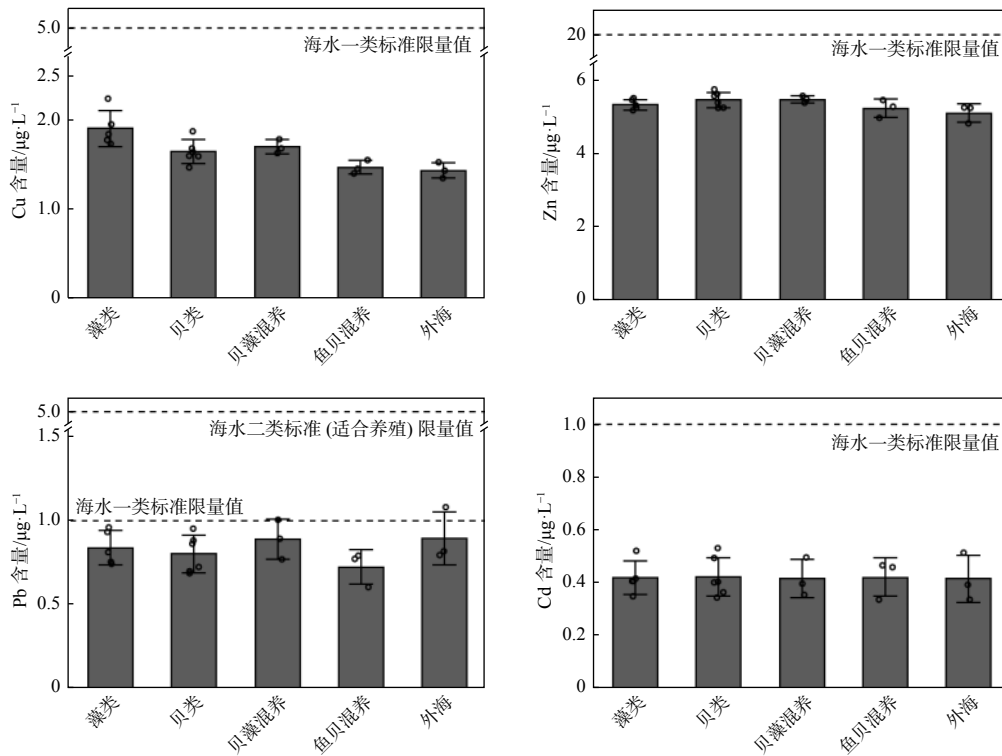


图4 桑沟湾表层海水不同养殖功能分区重金属含量(平均值±标准差)

Fig. 4 Concentration of heavy metal in the surface seawater of different mariculture zone in Sanggou bay (Mean±SD)

2.3 海水中重金属污染评价

将桑沟湾表层海水中各重金属指标的监测结果代入式(1)进行计算,其结果列于表2和表3中。

桑沟湾表层海水重金属污染指数的季节变化如表2所示,所有季节中4种重金属的污染程度均为Zn<Cu<Cd<Pb。桑沟湾海域表层海水重金属污染指数存在季节性差异,Zn在不同季节的污染程度是冬季<秋季<春季<夏季,Cu、Pb、Cd 3种重金属不同季节污染程度均为秋季<冬季<春季<夏季。Cu、Zn两种重金属全年污染指数均处于自然本底范围,而Pb的污染指数在春季与夏季处于轻度污染范围,在秋季和冬季处于较清洁范围,Cd的污染指数在秋季和冬季处于自然本底范围,在春季与夏季则处于清洁范围。因此,建议重点加强春、夏两季Pb的监测和控制。

桑沟湾不同养殖功能分区表层海水重金属的全年平均污染指数如表3所示,整体上,不同

养殖分区4种重金属污染程度为鱼贝混养<贝类<外海<藻类<贝藻混养。所有分区中Cu的污染

表2 桑沟湾表层海水不同季节重金属污染指数

Tab.2 Seasonal variation of heavy metal pollution index in the surface seawater of the Sanggou bay

季节	项目	Cu	Zn	Pb	Cd
春	最小值	0.24	0.23	0.59	0.19
	最大值	0.58	0.33	1.55	0.62
	平均值	0.34	0.28	0.97	0.40
夏	最小值	0.28	0.26	0.56	0.28
	最大值	0.53	0.33	1.38	0.92
	平均值	0.39	0.29	0.98	0.57
秋	最小值	0.23	0.24	0.38	0.18
	最大值	0.44	0.28	1.02	0.54
	平均值	0.29	0.26	0.68	0.34
冬	最小值	0.23	0.24	0.48	0.24
	最大值	0.47	0.27	0.94	0.61
	平均值	0.33	0.25	0.70	0.38

表3 桑沟湾不同养殖功能分区表层海水重金属污染指数

Tab.3 Heavy metal pollution index in the surface seawater of different mariculture zone in Sanggou bay

分区	项目	Cu	Zn	Pb	Cd
藻类	最小值	0.24	0.24	0.58	0.19
	最大值	0.58	0.33	1.39	0.90
	平均值	0.38	0.27	0.85	0.42
贝类	最小值	0.24	0.24	0.46	0.18
	最大值	0.51	0.31	1.55	0.92
	平均值	0.33	0.31	0.81	0.42
贝藻混养	最小值	0.29	0.24	0.57	0.28
	最大值	0.41	0.32	1.14	0.66
	平均值	0.34	0.27	0.89	0.42
鱼贝混养	最小值	0.23	0.23	0.38	0.24
	最大值	0.41	0.30	1.31	0.71
	平均值	0.30	0.26	0.73	0.42
外海	最小值	0.23	0.23	0.56	0.28
	最大值	0.43	0.28	1.32	0.61
	平均值	0.29	0.26	0.91	0.42

程度均处于清洁范围, Zn 的污染程度均处于自然本底范围。Pb 的污染程度整体上处于轻度污染范围, 其中, 藻类养殖区污染指数的两个最大值站点是 D9 和 D7, 污染指数分别为 1.39 和 1.38, 贝类养殖区污染指数最大值站点是 D12, 污染指数为 1.55, 贝藻混养区污染指数的两个最大值站点是 D8 和 D11, 污染指数分别为 1.14, 鱼贝混养区污染指数最大值站点是 D17, 污染指数为 1.31, 这些站点主要分布于桑沟湾养殖区北部近岸处及湾内中心部, 前者可能是由于桑沟湾北部沿岸的生活废水排放、工业企业排污、船舶停靠运输等原因导致重金属含量较高, 后者可能是由于桑沟湾内分布着密集的养殖设施和生物等, 极大地削弱了海流, 使得重金属在湾内中心部聚集^[8]。但 Pb 的污染指数总体上与外海区域一致甚至略低, 这说明桑沟湾养殖区整体污染程度与外海海域基本一致。贝藻混养区和鱼贝混养区 Cd 的污染程度均处于较清洁范围, 藻类养殖区和贝类养殖区 Cd 的部分站点污染程度均已达到轻度污染范围, 值得注意的是, 4 个养殖区 Cd 污染指数均值均为 0.42, Cd 在海水中主要以 CdCl₂ 的胶体状态存在, 在 4 个养殖分区中含量差别不

大, 这可能与 Cd 的输入方式有关, 因为 Cd 主要通过大气沉降或陆源污染排放等途径进入海中, 大部分以离子态和吸附态存在于水中和悬浮胶体上, 其余以残渣形式存在于底质中^[9]。综上, 我们建议应重点加强对藻类养殖区和贝类养殖区 Cd 以及对所有分区 Pb 的监测, 并严格控制桑沟湾北部沿岸的陆源排放。

如表 4 所示, Cu、Pb、Zn、Cd 4 种重金属在春、夏、秋、冬 4 个季节均未表现出正相关关系, 说明这 4 种重金属的来源及其在海水中的赋存状态均不相似。重金属的赋存形态决定了其在水体中的迁移转化规律、毒性大小以及环境毒理效应^[10], 海水中的重金属主要分为电化学活性态和非活性态、可交换态和非交换态。夏彧等^[11]研究表明, 天然海水中 Cu 的主要形式为低价态的 CuCl₃²⁻、CuCl₂⁻和高价态的 Cu(OH)₂, 这与赵胜男等^[12]对乌梁素海水体中 Cu 的存在形态研究结果基本一致, 而 Zn 的主要形式为 Zn²⁺、ZnCl⁺和 ZnCO₃, Pb 的主要形式为 PbCO₃、PbCl⁺和 PbCl₂, Cd 的主要形式为 Cd(OH)₃⁺和二价态的 CdCl⁺、CdCl₂(比例均依次减小)^[11]。桑沟湾表层海水中 4 种重金属的差异可能是陆源输入、大气沉降、海流、海水理化性质波动等多种因素复合作用的结果。例如, 船舶受到侵蚀被认为是海水中 Cu、Zn、Cd 3 种重金属的重要来源之一, 因为合金船体中含有大量 Cu 和 Zn, 船体防腐蚀材料中含有大量的重金属 Cd^[13-14]。但本研究中 Cu、Zn、Cd 3 种重金属并未表现出正相关关系, 说明桑沟湾表层海水中 Cu、Zn、Cd 同时来源于船舶污染的可能性较小, 因为合金船舶往往同时含有这 3 种重金属。

如表 5 所示, 与国内其他海水养殖区相比, 桑沟湾表层海水中 Cu、Zn 的平均含量除了比兴城邳家湾养殖区略高外, 均为最低水平。Pb 的平均含量虽然比兴城邳家湾和天津汉沽养殖区略高, 但比江苏如东和天津北部养殖区低 2~3 倍, 与宁波象山港和广西廉州湾养殖区相比基本持平, 整体上在国内处于较低水平。Cd 的平均含量除了与兴城邳家湾养殖区几乎持平外, 比其他 5 个养殖区的平均含量均高 2 倍, 整体上处于较高水平, 尽管如此, 桑沟湾表层海水中 Cd 的污

表4 重金属之间相关分析
Tab.4 Correlation analysis between heavy metals

		春季				夏季			
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cu	Zn	Pb	Cd	
Cu	1				Cu	1			
Zn	0.122	1			Zn	0.046	1		
Pb	-0.234	0.232	1		Pb	-0.038	-0.415	1	
Cd	-0.038	0.046	-0.001	1	Cd	0.053	0.109	-0.400	
		秋季				冬季			
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cu	Zn	Pb	Cd	
Cu	1				Cu	1			
Zn	-0.004	1			Zn	-0.180	1		
Pb	0.240	-0.038	1		Pb	0.013	-0.449*	1	
Cd	-0.005	-0.182	-0.222	1	Cd	-0.218	0.370	-0.239	

*在0.05级别(双尾),相关性显著

表5 国内不同海水养殖区海水重金属含量比较($\mu\text{g/L}$)

Tab.5 Concentration of heavy metal in seawater of different mariculture areas in China($\mu\text{g/L}$)

养殖区	年份	项目	Cu	Zn	Pb	Cd	参考文献
桑沟湾	2019	范围	1.14 ~ 2.88	4.62 ~ 6.53	0.38 ~ 1.55	0.18 ~ 0.92	本研究
		均值	1.68	5.39	0.83	0.42	
江苏如东	2010	范围	0.30 ~ 5.01	6.88 ~ 39.63	0.09 ~ 4.89	0.01 ~ 0.78	[15]
		均值	2.64	22.42	1.48	0.18	
天津北部	2012	范围	1.72 ~ 4.19	—	1.34 ~ 3.74	0.23 ~ 0.30	[16]
		均值	2.60	—	2.74	0.261	
	2013	范围	1.13 ~ 4.91	—	0.086 ~ 3.59	0.079 ~ 0.27	
		均值	2.28	—	1.73	0.20	
宁波象山港	2014	范围	2.10 ~ 3.40	15.60 ~ 18.90	0.27 ~ 0.96	0.13 ~ 0.20	[17]
		均值	3.00	17.40	0.56	0.17	
广西廉州湾	2016	范围	2.30 ~ 4.40	—	0.70 ~ 0.90	0.25 ~ 0.27	[18]
		均值	3.20	—	0.80	0.26	
	2017	范围	1.00 ~ 2.50	—	0.40 ~ 1.00	0.24 ~ 0.34	
		均值	1.90	—	0.70	0.30	
兴城邨家湾	2015	均值	0.98	—	2.10	0.40	[19]
天津汉沽	2014	范围	11.64 ~ 17.28	68.25 ~ 226.68	0.07 ~ 0.39	0.030 ~ 0.36	[20]
		均值	15.33	139.22	0.24	0.16	
海水一类标准			5	20	1	1	
海水二类标准(适合养殖)			10	50	5	5	

注: “—”表示文献中无相关数据

染等级依然处于清洁水平。上述分析表明,桑沟湾表层海水中重金属的污染程度较低,适宜水产养殖。

3 结论

(1)桑沟湾表层海水中重金属含量大致呈自

西向东先递增后递减的趋势, 其中贝藻混养区重金属含量最高, 鱼贝混养区最低。

(2) 桑沟湾表层海水中 4 种重金属含量为 $Cd < Pb < Cu < Zn$, 污染程度为 $Zn < Cu < Cd < Pb$, 并表现出一定的季节变化, 其中夏季相对较高, 提示我们在夏季应加强对重金属 Pd 的监测与管控。

(3) 桑沟湾养殖区表层海水中 4 种重金属间均未表现出正相关关系, 这说明其来源和在海水中的赋存状态不同。

(4) 与国内其他海水养殖区相比, 桑沟湾表层海水中 Cu、Zn、Pb 的平均含量较低, Cd 的含量相对较高, 但仍属于清洁水平, 整体上符合国家一类海水水质标准, 适宜水产养殖。

参考文献:

- [1] 夏 斌, 陈碧鹃, 崔 毅, 等. 夏季桑沟湾养殖水域有机碳的平面分布特征及其来源分析[J]. *渔业科学进展*, 2013, 34(1): 44-49.
- [2] 杨文超, 黄道建, 陈继鑫, 等. 大亚湾2010—2018年表层沉积物中重金属含量时空分布及生态风险评价[J]. *南方水产科学*, 2020, 16(4): 39-46.
- [3] 赵晨辉, 胡 佶, 李发明, 等. 广东汕头湾表层沉积物重金属含量分布及风险评价[J]. *应用海洋学学报*, 2020, 39(3): 408-418.
- [4] 张 羲, 于一雷, 李胜男, 等. 潮河沉积物重金属污染特征及生态风险评价[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(7): 169-179.
- [5] 孙鸿运, 胡 泓, 高 培, 等. 大清河表层沉积物重金属生态风险评价[J]. *海洋湖沼通报*, 2020 (5): 95-104.
- [6] 贾 磊, 刘文涛, 唐得昊, 等. 三亚湾及周边海域表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(12): 22-31.
- [7] 贾晓平, 杜飞雁, 林 钦, 等. 海洋渔场生态环境质量状况综合评价方法探讨[J]. *中国水产科学*, 2003, 10(2): 160-164.
- [8] MARTIN S, THOUZEAU G, CHAUVAUD L, et al. Respiration, Calcification, and excretion of the invasive slipper limpet, *Crepidula fornicata* L.: implications for carbon, carbonate, and nitrogen fluxes in affected areas[J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(5): 1996-2007.
- [9] 崔 毅, 幸福言, 马绍赛, 等. 乳山湾贝类体中重金属含量及其评价研究[J]. *海洋水产研究*, 1997, 18(2): 46-54.
- [10] MUEZZINOGLU A, CIZMECIOGLU S C. Deposition of heavy metals in a Mediterranean climate area[J]. *Atmospheric Research*, 2006, 81(1): 1-16.
- [11] 夏 彧, 徐 真, 马英杰, 等. 天然海水中痕量重金属元素形态分布的数值模拟[J]. *桂林理工大学学报*, 2016, 36(3): 597-602.
- [12] 赵胜男, 史小红, 张汉蒙, 等. 乌梁素海水体重金属元素赋存形态模拟分析[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(2): 341-349.
- [13] MATTHIESSEN P, REED J, JOHNSON M. Sources and potential effects of copper and zinc concentrations in the estuarine waters of Essex and Suffolk, United Kingdom[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1999, 38(10): 908-920.
- [14] 罗万次, 苏 搏, 刘 熊, 等. 广西北仑河口红树林保护区表层海水溶解态重金属时空分布及其影响因素[J]. *海洋通报*, 2014, 33(6): 668-675.
- [15] 廖 勇, 黄厚见, 李 磊, 等. 江苏如东贝类养殖区重金属的含量分布特征及潜在生态风险评价[J]. *中国环境监测*, 2012, 28(6): 4-9.
- [16] 何 荣, 刘 洋. 天津北部近岸增殖养殖区重金属污染的调查与评价[J]. *海洋湖沼通报*, 2015 (4): 149-154.
- [17] 徐国锋, 何东海, 毛伟宏, 等. 象山港毛蚶种苗区重金属的含量分布特征及生态风险评价[J]. *应用海洋学学报*, 2016, 35(3): 348-355.
- [18] 陈继艺, 冀春艳, 陈旭阳, 等. 广西廉州湾贝类养殖区重金属的含量变化及潜在生态风险评价[J]. *应用海洋学学报*, 2018, 37(4): 568-576.
- [19] 李 奇, 李 丽, 王 琪, 等. 2015年兴城养殖区水域水质重金属含量的分析与评价[J]. *河北渔业*, 2016 (11): 12-13, 36.
- [20] 韩现芹, 陈春秀, 贾 磊. 汉沽养殖区海水重金属含量分布特征及潜在生态危险评价[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(20): 66-68.