

# 休渔期和捕捞作业期黄、渤海区沿海中心渔港表层海水重金属分布及生态风险评估

孙铭阳<sup>1,2,3</sup>, 张旭志<sup>2,3</sup>, 夏斌<sup>2,3</sup>, 曲克明<sup>2,3</sup>, 崔正国<sup>2,3</sup>,  
丁东生<sup>2,3</sup>, 李玉<sup>1</sup>

(1.江苏海洋大学海洋技术与测绘学院,江苏连云港 222005; 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)

**摘要:**为了弄清休渔期和捕捞作业期黄、渤海区沿海中心渔港表层海水重金属污染水平,本研究于 2020 年 5 月和 10 月在黄、渤海区沿海 11 个中心渔港采集水样,分析了 Cu、Zn、Pb、Cd、Hg 和 As 6 种重金属的浓度及污染特征,探讨了其主要来源,并评估了其生态风险。结果表明,休渔期 Cu、Zn、Pb、Cd、Hg 和 As 的浓度范围分别为 1.26~4.46 μg/L、4.10~22.72 μg/L、1.18~16.76 μg/L、0.54~7.80 μg/L、0.02~0.08 μg/L 和 0.02~0.86 μg/L; 捕捞作业期分别为 0.60~4.62 μg/L、4.92~10.61 μg/L、0.16~2.95 μg/L、0.14~2.95 μg/L、0.03~0.11 μg/L 和 0.16~1.37 μg/L, 休渔期和捕捞作业期各渔港的 Cu、Zn、Pb、Cd、Hg 和 As 浓度均值满足《海水水质标准》(GB 3097—1997) 四类标准; 黄海沿海中心渔港表层海水重金属浓度略低于渤海地区, 与我国东海地区和南海地区相比, 黄、渤海区 Cu、Pb 和 Cd 浓度处于较高水平, Zn 和 Hg 浓度处于中等水平, As 浓度处于较低水平。分析发现, 休渔期和捕捞作业期 Zn 和 As 来自陆源, Cu 来自陆源和船舶防污漆, 表层海水 Pb 与大气沉降和燃料尾气有关。沿海中心渔港表层海水重金属综合污染指数均处于自然本底范围, 且生态风险指数 (ERI) 值 (0.84~1.45) 也都属于生态低风险和无风险类别, 但 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的危害系数 (HQ<sup>i</sup>) 大于 1, 属于潜在关注指标, 应予以关注。

**关键词:**中心渔港; 重金属; 分布; 生态风险评估

中图分类号: X55; X820.4

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2022)06-0857-08

## Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface seawater of central fishing ports along the coast of the Yellow Sea and Bohai Sea during fishing off season and fishing season

SUN Ming-yang<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Xu-zhi<sup>2,3</sup>, XIA Bin<sup>2,3</sup>, QU Ke-ming<sup>2,3</sup>,  
CUI Zheng-guo<sup>2,3</sup>, DING Dong-sheng<sup>2,3</sup>, LI Yu<sup>1</sup>

(1.School of Marine Technology and Geomatics, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, 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

收稿日期: 2021-09-20, 修订日期: 2022-03-22

基金项目: 江苏省自然科学基金面上项目 (BK20171262); 农业农村部政府购买服务项目 (17200001)

作者简介: 孙铭阳 (1996—), 男, 江苏连云港人, 硕士研究生, 主要从事渔业环境监测与评价研究, E-mail: [sunshinemingyang@outlook.com](mailto:sunshinemingyang@outlook.com)

通讯作者: 丁东生, 男, 助理研究员, 主要从事渔业生态环境研究, E-mail: [dings@ysfri.ac.cn](mailto:dings@ysfri.ac.cn)

李玉, 女, 教授, 主要从事海洋环境监测研究, E-mail: [liy241@sina.com](mailto:liy241@sina.com)

Shandong Province, Qingdao 266071, China; 3. Marine Ecology and Environmental Science Laboratory, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071, China)

**Abstract:** In order to study the pollution level of heavy metals in the surface seawater of the central fishing ports in the Yellow Sea and the Bohai Sea during the fishing off period and fishing period, sampling stations were set up in 11 central fishing ports along the coast of the Yellow and Bohai Sea in May and October 2020 to conduct water sample analysis. The content and pollution characteristics of 6 heavy metals including Zn, Pb, Cd, Hg and As were evaluated and analyzed, then, the main sources of heavy metals were explored and their ecological risks were assessed. The results showed that the range of concentrations of Cu, Zn, Pb, Cd, Hg and As during the fishing off season were 1.26 ~ 4.46  $\mu\text{g/L}$ , 4.10 ~ 22.72  $\mu\text{g/L}$ , 1.18 ~ 16.76  $\mu\text{g/L}$ , 0.54 ~ 7.80  $\mu\text{g/L}$ , 0.02 ~ 0.08  $\mu\text{g/L}$  and 0.02 ~ 0.86  $\mu\text{g/L}$  respectively. While which in the fishing season were 0.60 ~ 4.62  $\mu\text{g/L}$ , 4.92 ~ 10.61  $\mu\text{g/L}$ , 0.16 ~ 2.95  $\mu\text{g/L}$ , 0.14 ~ 2.95  $\mu\text{g/L}$ , 0.03 ~ 0.11  $\mu\text{g/L}$  and 0.16 ~ 1.37  $\mu\text{g/L}$  respectively. All the average concentrations of Cu, Zn, Pb, Cd, Hg and As of each fishing port were lower than the fourth categories of national seawater quality standards (GB 3097—1997). The concentrations of heavy metals in the surface seawater of the fishing port along the coastal of the Yellow Sea is slightly lower than that in the Bohai Sea. Compared with the East China Sea and the South China Sea, the concentration of Cu, Pb and Cd in the Yellow Sea and Bohai Sea is at a high level, the content of Zn and Hg is at a medium level, while the content of As is at a low level. It is found that Zn and As come from land discharging, while Cu come from both the land discharging and marine antifouling paint during the fishing off period and fishing period. However, Pb in surface seawater is related to the atmospheric deposition and fuel exhaust in the fishing port zone. Even though the comprehensive pollution index of heavy metals in the surface seawater of the central coastal fishing port is in the natural background range, and the ecological risk index (*ERI*) values (0.84 ~ 1.45) of heavy metals in the surface seawater of the coastal central fishing port are also in low risk or risk-free categories to the ecological, the Hazard Quotient (*HQ<sup>i</sup>*) values of Cu, Zn, Pb and Cd are greater than 1, which were identified as potential heavy metals to be concerned.

**Key words:** central fishing port; heavy metals; distribution; ecological risk assessment

重金属是水生环境中稳定、持久、不可生物降解的有毒污染物,对包括人类在内的众多生物构成一定的风险<sup>[1-4]</sup>。随着工业化和城镇化的快速发展,重金属相关产业也明显增长,人类活动会直接或间接地将重金属排放到环境中,环境中高浓度的重金属会通过空气、水和食物等介质进入人体并蓄积,从而导致慢性损伤,最终造成机体不可逆的病变<sup>[2]</sup>。值得注意的是,一些重金属经络合或螯合反应后会具有更高的毒性<sup>[3]</sup>。海水中重金属浓度的持续增加引起了人们的广泛关注<sup>[1]</sup>。

我国是世界渔业大国,渔船数、渔民数和水产品产量均居世界第一。渔港既是渔业安全生产最重要的基础设施,也是开发海洋生物资源的重要基地和枢纽,是沿海众多中小城镇的重要依托,但渔港“脏乱差”情况较为突出,渔港环境亟需得到改善<sup>[5]</sup>。渔港多为半封闭式港湾,水体

交换不畅,自净能力较弱,尤其是陆源排放(如沿岸工业和生活污水排放)、船舶运输(船舶尾气排放后沉降)和滨海旅游业等会加剧水体重金属污染问题<sup>[4]</sup>。

目前,国内外海水重金属相关研究主要聚焦于近岸海域,对渔港水体重金属污染研究较少,未见针对渔港环境开展系统性研究的相关报道。渔港海水水质评价常用的方法有单因子污染指数法和综合污染指数法<sup>[6-9]</sup>。其中,单因子污染指数法是评价海水重金属污染的常用方法,但无法表征因子对水生生物的潜在风险;综合污染指数法评价更全面,且突出了浓度之间的差别,但无法表征各因子对水生生物的潜在风险。与前述两种方法相比,生态风险评价则能很好地表征生态系统健康和潜在人类健康风险间的关系。

黄、渤海是我国重要的“蓝色粮仓”,黄、

渤海区(山东省、河北省、辽宁省和天津市三省一市)渔港具有较强的代表性。本文选取黄、渤海区沿海具有代表性的 11 个中心渔港(根据农业农村部定义的渔港等级分类标准,将渔港分为以下四级:中心级、一级、二级、三级)为研究对象,分别在休渔期和捕捞作业期对表层海水重金属浓度开展了系统、全面的调查,查明了重金属分布特征并探讨了其可能的来源,引入生态风险指数,分析了多种重金属同时存在造成的总体风险,评估了黄、渤海区沿海中心渔港表层海水的重金属生态风险,研究结果可为渔业主管部门科学管理渔港水环境提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查时间与站位

调查时间为 2020 年 5 月(休渔期)和 10 月(捕捞作业期)。监测区域为黄、渤海区沿海 11 个中心渔港(其中,山东省 5 个,河北省 1 个,辽宁省 4 个,天津市 1 个)。每个渔港设置 4 个取样点(港池内均匀布设 3 个取样点,港池口处布设 1 个取样点),渔港基本信息见表 1。

表 1 中心渔港位置表  
Tab.1 Location table of central fishing port

渔港名称	省份	经度	纬度
红岛中心渔港	山东省	120.4675°E	36.3722°N
日照中心渔港	山东省	119.4879°E	35.3220°N
威海中心渔港	山东省	122.0899°E	37.5457°N
羊口中心渔港	山东省	118.8807°E	37.2696°N
长岛中心渔港	山东省	120.7249°E	37.9261°N
天津中心渔港	天津市	117.8543°E	39.1811°N
嘴东渔港	河北省	118.3521°E	39.0560°N
锦州中心渔港	辽宁省	121.0784°E	40.8466°N
将军石渔港	辽宁省	121.6854°E	39.9247°N
杏树中心渔港	辽宁省	122.1867°E	39.2564°N
董砣子渔港	辽宁省	121.1165°E	38.8676°N

### 1.2 样品的采集与测定

按照《海洋监测规范》(GB 17378.3—2007),使用有机玻璃采水器采集表层水样(水面下 25 ~ 50 cm),水样经 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤后加

入硝酸固定(pH 小于 2),冷藏保存。

根据《海洋监测规范》(GB 17378.4—2007),海水 Cu、Pb、Zn、Cd 样品经萃取富集 40 倍后用原子吸收分光光度计(PinAAcle 900T 型,铂金埃尔默仪器有限公司)测定;海水 As 样品用盐酸、硫脲—抗坏血酸溶液进行预处理后,用原子荧光分光光度计(AFS-933 型,北京吉天仪器有限公司)测定;海水 Hg 样品先用硫酸氧化,再用过硫酸钾消化 24 h 后,用原子荧光分光光度计(AFS-933 型,北京吉天仪器有限公司)测定。

海水温度、pH、溶解氧(DO)和盐度等水质数据使用美国 YSI 多参数仪(556MPS)现场测定,化学需氧量(COD)和石油类样品的采集、保存、运输和分析均依据《海洋监测规范》(GB 17378.3—2007)和《海洋调查规范》(GB 17378.4—2007)进行。本文聚焦渔港重金属污染现状,对其他环境因子的描述仅用于探索性数据分析。

### 1.3 评价方法

渔港海水重金属污染状况评价采用单因子污染指数( $P_i$ )法和综合污染指数( $PI$ )法,其计算公式如下:

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

$$PI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

式中: $P_i$ 为水体中重金属单因子污染指数,反映第*i*项重金属污染程度; $C_i$ 为重金属浓度的实测值(μg/L); $S_i$ 为《海水水质标准》四类海水水质标准中重金属浓度的限量值(μg/L); $PI$ 为水体中重金属的综合污染指数,反映各站位重金属(Cu、Zn、Pb、Cd、Hg 和 As)对渔港表层海水的综合污染程度。评价等级参照贾晓平<sup>[10]</sup>的相关研究结果。

本文用修正熵法评估海水重金属生态风险并确定潜在关注的重金属元素( $HQ > 1$ )。 $HQ$ 用于确定接触有毒金属造成的潜在非致癌人类健康风险,计算方法见公式(3)。为确定多种重金属同时存在所造成的总体风险,并说明它们在毒性程度上的差异,将标准化毒性反应系数引入整体生态风险指数( $ERI$ )的计算,详见公式(4)。

$$HQ^i = S^i / PNEC^i \quad (3)$$

$$ERI = \sum_1^n (HQ^i \times T^i) / \sum_1^n T^i \quad (4)$$

式中:  $ERI$ 是海水中多种重金属的综合生态风险指数;  $S^i$ 是水样中重金属含量( $\mu\text{g/L}$ );  $HQ^i$ 是与重金属相对应的危害系数;  $PNEC^i$ 是重金属的预测无效应浓度,可通过美国环保局慢性毒性标准基准连续浓度除以安全系数5得到;  $T^i$ 是重金属毒性反应因子(其中,  $T^{\text{Cu}}=5$ ,  $T^{\text{Zn}}=1$ ,  $T^{\text{Pb}}=5$ ,  $T^{\text{Cd}}=30$ ,  $T^{\text{Hg}}=40$ ,  $T^{\text{As}}=10$ )。  $ERI \leq 1$ 、 $1 < ERI \leq 5$ 、 $5 < ERI \leq 10$ 、 $10 < ERI \leq 15$ 、 $ERI > 15$ 分别对应无风险、低风险、中等风险、较高风险、高风险等级。

#### 1.4 数据处理方法

重金属浓度数据采用各渔港港池内3个站位的浓度平均值,数据处理、分析与绘图使用Excel 2010、SPSS 16.0和Origin 2018等软件。

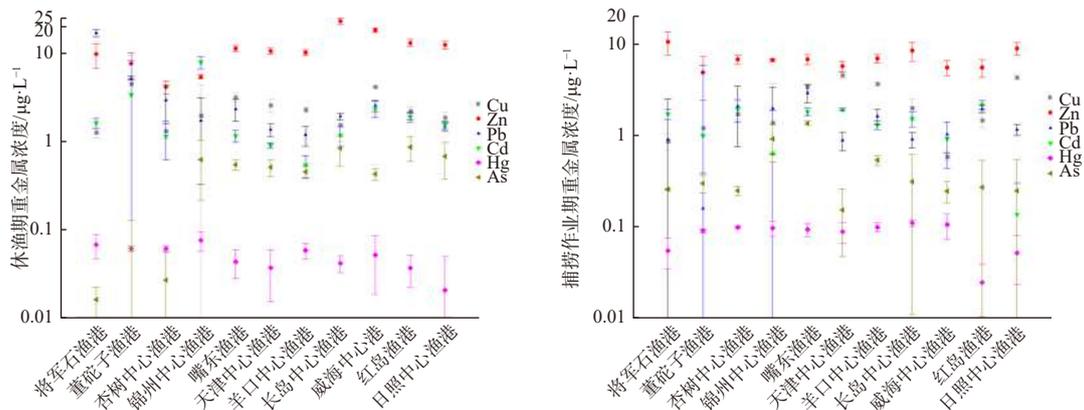


图1 表层海水中重金属浓度(平均值±标准差)

Fig. 1 Heavy metal content in surface sea water ( $Mean \pm SD$ )

大部分渔港表层海水中重金属 Zn、Pb、Cd 和 Hg 的浓度表现为休渔期 > 捕捞作业期,而辽东湾近岸海水中重金属 Zn、Pb 和 As 的浓度也具有相似的变化趋势:5月(春季) > 10月(秋季)<sup>[12]</sup>。辽东湾海水中重金属 Cu、Zn、Pb、Cd、Hg 和 As 主要来源于降雨、河流等陆源输入以及大气沉降<sup>[13]</sup>,渔港表层海水中 Zn、Pb、Cd 和 Hg 具有与其相同的来源。

各渔港 Cu、Zn、Pb、Cd、Hg 和 As 浓度均符合《海水水质标准》(GB3097—1997)四类标准,

## 2 结果与讨论

### 2.1 休渔期和捕捞作业期渔港表层海水重金属分布特征

黄、渤海区沿海中心渔港表层海水中 Cu、Zn、Pb、Cd、Hg 和 As 浓度如图1所示。休渔期 Cu、Zn、Pb、Cd、Hg 和 As 的浓度范围分别为 1.26 ~ 4.46  $\mu\text{g/L}$ 、4.10 ~ 22.72  $\mu\text{g/L}$ 、1.18 ~ 16.76  $\mu\text{g/L}$ 、0.54 ~ 7.80  $\mu\text{g/L}$ 、0.02 ~ 0.08  $\mu\text{g/L}$  和 0.02 ~ 0.86  $\mu\text{g/L}$ ; 捕捞作业期分别为 0.60 ~ 4.62  $\mu\text{g/L}$ 、4.92 ~ 10.61  $\mu\text{g/L}$ 、0.16 ~ 2.95  $\mu\text{g/L}$ 、0.14 ~ 2.95  $\mu\text{g/L}$ 、0.03 ~ 0.11  $\mu\text{g/L}$  和 0.16 ~ 1.37  $\mu\text{g/L}$ 。从浓度来看, Cu、Zn、Pb、Cd 和 As 均表现为休渔期 > 捕捞作业期; Hg 则表现为休渔期 < 捕捞作业期。Hg 的这种分布特征与其主要来源——船舶及大气沉降<sup>[11]</sup>密切相关,捕捞作业期渔港船只进出频繁,船舶和汽车尾气排放也明显增加。

31.91% 的渔港 Cu 浓度超过美国环保局<sup>[14]</sup>急性毒性标准  $CMC$  ( $CMC$ —基准最大浓度, 4.8  $\mu\text{g/L}$ ) 和慢性毒性标准  $CCC$  (基准连续浓度, 3.1  $\mu\text{g/L}$ ), 休渔期仅将军石渔港的 Pb 浓度 (8.1  $\mu\text{g/L}$ ) 超过  $CCC$ , 其他指标均低于  $CMC$  和  $CCC$ 。

由表2可知,与国外渔港相比,黄、渤海区沿海11个中心渔港重金属浓度均高于顿斯维尔港;土耳其伊兹密尔港 Zn 含量低于黄、渤海区沿海11个中心渔港。与国内渔港相比,相对于东海沿岸地区(洋山港、象山港和白马港)和南

海沿岸地区(湛江港、新村港、水东港和东寨港)渔港,黄、渤海区沿海中心渔港表层海水中重金属 Cu、Pb 和 Cd 浓度处于较高水平,Zn 和 Hg 浓度处于中等水平,As 浓度则处于较低水平;连云港港口及邻近海域重金属浓度<sup>[6]</sup>相对较低;象山港主港重金属 As 浓度高于黄、渤海区 11 个中心渔港。经分析,象山港主港重金属 As 主要源于其汇水区,汇区内有电镀厂等化工厂分布<sup>[15]</sup>。

与渔港相应的近岸海域相比,日照中心渔港(南黄海)、羊口中心渔港(莱州湾)、杏树中心渔港(北黄海)大部分重金属浓度高于港外近岸海域;而红岛中心渔港(胶州湾)则与之相反;辽东湾和渤海湾海域沿岸渔港表层海水重金属浓度

分布无明显规律。杏树中心渔港、羊口中心渔港和日照中心渔港陆源输入影响更明显;其他渔港在受陆源输入影响的同时还受到渔业生产、船舶运输和渔港水交换能力的影响。

## 2.2 休渔期和捕捞作业期渔港表层海水重金属污染指数

依据《海水水质标准》(GB 3097—1997)四类标准,计算出重金属单因子污染指数( $P_i$ )和综合污染指数( $PI$ )。结果显示,各中心渔港表层海水重金属(Cu、Zn、Pb、Cd、Hg 和 As)综合污染程度处于自然本底范围;从单因子污染指数来看,除休渔期锦州中心渔港处于较清洁范围外,其余渔港均处于自然本底范围。

表 2 国内外渔港及邻近海域重金属浓度

Tab.2 Heavy metal content in fishing ports and adjacent areas at home and abroad

区域	浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$						时间	参考文献
	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As		
顿斯维尔港	0.58	ND	2.07	<0.9	ND	ND	2011	[16]
伊兹密尔港	3.0	3.7	1.5	0.24	0.01	ND	2000	[17]
洋山港潮间带	1.49	38.7	0.79	0.81	0.13	1.38	2012	[18]
象山港	1.6	17.8	2.5	0.12	0.02	1.8	2002	[15]
湛江港	ND	14.2	ND	ND	ND	ND	2009	[19]
连云港港口邻近海域	1.9	0.4	0.21	0.01	ND	ND	2007	[6]
新村港	1.9	14.49	0.87	0.073	ND	1.67	2015	[3]
白马港	0.43	6.35	1.15	0.05	ND	ND	2005	[7]
水东港	5.289	ND	2.513	0.01	0.02	0.421	2005	[8]
东寨港	3.01	8.6	1.55	0.24	0.03	1.9	2010	[9]
渤海	3.43	1.05	8.14	0.45	0.04	1.66	2002	[20]
北黄海(5月)	0.8	3.8	0.35	0.14	ND	ND	2007	[1]
北黄海(10月)	1.4	8.1	0.4	0.24	ND	ND	2007	[1]
南黄海	1.41	6.21	0.37	0.078	0.0036	2.33	2004	[21]
辽东湾	3.81	8.62	1.35	0.58	0.05	2.14	2002	[20]
渤海湾	3.76	6.94	0.92	0.48	0.04	1.44	2002	[20]
莱州湾(5月)	2.18	6.09	1.25	0.12	0.075	2.94	2010	[22]
莱州湾(10月)	2.12	15.93	0.76	0.12	0.05	3.2	2010	[22]
胶州湾(5月)	2.58	24.86	1.05	0.096	ND	0.043	2003	[2]
胶州湾(11月)	4.02	16.55	0.63	0.093	ND	0.06	2003	[2]

前人研究显示,莱州湾<sup>[22]</sup>和胶州湾<sup>[2]</sup>表层海水重金属浓度大部分表现为 5 月 > 10 月,这与其近岸渔港 Cu、Zn、Pb、Cd 和 As 有相似的分布

特征,说明上述重金属与其近岸海域相应重金属具有相同的来源;而 Hg 则主要受渔船大量停靠和港区陆域交通密集的影响<sup>[11]</sup>。休渔期渔船全

部靠港休整,渔民利用休渔期对渔船进行清理整修,有一定数量的渔民仍然留在渔船上生活,可能存在非法排污现象,这可能是部分指标在休渔期更高的重要原因之一<sup>[9]</sup>。

### 2.3 休渔期和捕捞作业期表层海水重金属的来源

休渔期和捕捞作业期的皮尔逊相关性分析结果(羊口中心渔港和杏树中心渔港为河道型渔港,未加入相关性分析)(表3)表明,在休渔期,Zn和COD呈极显著正相关关系( $R=0.814, p < 0.05$ ),说明两者具有相同来源,而COD被普遍认为来自陆源,渔港溶解态Zn以陆源输入为主,这也与已有研究结论——农业废水、养殖污水

和工业污染是Zn的重要来源<sup>[19]</sup>一致;Pb与As呈极显著负相关关系( $R=0.742, p < 0.05$ ),说明两者来源不同,而已有研究表明As主要来自陆源,Pb则受渔业生产活动影响更大。在捕捞作业期,As与COD呈正相关关系( $R=0.773, p < 0.01$ ),说明As主要来自陆源,这与已有研究结果——As主要来源于沿岸工业废水排海<sup>[3]</sup>一致;As与Pb呈极显著正相关关系( $R=0.814, p < 0.05$ ),在捕捞作业期,Pb与As的主要来源相同。已有研究显示,Pb主要来自机动车和船舶尾气以及电镀工业废水<sup>[23]</sup>,而渔港水环境中的Pb污染则主要来自河流、排污口、燃料燃烧和大气沉降<sup>[21]</sup>。

表3 相关性分析

Tab.3 Correlation analysis table

指标	水温	pH	DO	盐度	COD	石油类	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As
水温		-0.607	-0.738*	-0.620	0.266	-0.125	-0.429	0.266	-0.500	-0.187	-0.606	0.821*
pH	-0.625		0.086	0.115	0.178	0.023	0.262	0.361	0.332	-0.541	-0.096	-0.459
DO	-0.526	0.472		0.367	-0.570	-0.083	0.090	-0.471	0.538	0.524	0.779*	-0.554
盐度	-0.159	0.181	0.314		-0.025	0.327	0.556	-0.425	-0.127	0.633	0.629	-0.444
COD	0.354	-0.052	-0.406	-0.876**		0.540	0.086	0.814**	-0.358	-0.168	-0.110	0.354
石油类	0.082	-0.317	0.156	0.166	-0.086		0.617	0.284	-0.075	0.082	0.222	-0.214
Cu	-0.044	-0.261	-0.310	-0.635	0.381	-0.441		-0.090	-0.259	0.044	0.101	-0.359
Zn	0.074	0.350	0.285	0.068	0.089	-0.533	0.069		-0.226	-0.539	-0.454	0.448
Pb	-0.045	0.204	-0.258	-0.701*	0.662	-0.402	0.181	-0.031		-0.110	0.494	-0.742*
Cd	0.136	0.341	-0.203	0	0.123	-0.386	-0.021	-0.115	0.236		0.693*	-0.037
Hg	-0.409	0.143	0.408	-0.034	0.083	0.594	-0.062	-0.221	-0.124	-0.196		-0.565
As	-0.161	0.314	0.021	-0.753*	0.773*	0.013	0.095	-0.056	0.816**	0.029	0.286	

注:表格右上方为休渔期相关性,左下方为捕捞作业期相关性;\*表示在0.05水平上呈显著相关,\*\*表示在0.001水平上呈极显著相关

综上所述,休渔期Zn和As主要来自陆源,捕捞作业期Pb和As主要来自陆源。

选取黄、渤海区沿海9个中心渔港(除羊口中心渔港和杏树中心渔港外)表层海水Cu、Zn、Pb、Cd、Hg和As作为评价因子进行主成分分析,其载荷值越大,则与主成分之间的联系越紧密,结果见表4所示。休渔期提取了4个特征值大于1的主成分,约占总方差的90%;捕捞作业期则提取了5个特征值大于1的主成分,约占总方差的90%。休渔期和捕捞作业期的前两个主成分,在原始变量中占比分别为61.52%和

51.86%,前两个主成分能够反映全部数据所包含的大部分信息。

休渔期,第一主成分(PC1)的贡献率为40.03%,Hg和DO具有高正载荷,水温、As和Zn具有高负载荷;第二主成分(PC2)中的pH、石油类和Cu具有较高正载荷。渔港表层海水中Cu主要来自陆源和海源,陆源主要是陆域工业活动产生的含Cu废水排放;海源则主要为船舶等海源带入,例如,Cu金属制造的船舶配件或使用了铜基防污漆的船舶入海后将铜离子带入海洋环境中<sup>[24]</sup>。捕捞作业期,第一主成分(PC1)

的贡献率为 31.1%, COD、Pb 和 As 具有高正载荷, 水温、盐度具有高负载荷, 这很好地反映了径流输入过程中的稀释作用, 通常近淡水端的 pH、盐度更低, 而重金属和 COD 浓度较高, 这也佐证了捕捞作业期 Pb 和 As 来自陆源的结论; 第二主成分(PC2)中的 pH、DO、Hg 和 As 具有较高正载荷。在休渔期和捕捞作业期主成分(PC1 和 PC2)中, 具有最高载荷的评价因子 Pb 和 Hg 为渔港水质主要影响指标。

表 4 主成分分析结果  
Tab.4 Principal component analysis results

项目	休渔期		捕捞作业期	
	第一主成分	第二主成分	第一主成分	第二主成分
	PC1	PC2	PC1	PC2
Hg	0.869	-0.170	-0.142	0.529
DO	0.860	-0.104	-0.488	0.687
水温	-0.828	-0.477	0.234	-0.777
As	-0.809	-0.359	0.743	0.546
Zn	-0.703	0.510	0.018	0.185
盐度	0.650	0.290	-0.930	-0.037
COD	-0.609	0.521	0.908	0.033
pH	0.141	0.753	-0.055	0.827
Cu	0.245	0.642	0.542	-0.174
石油类	0.007	0.634	-0.371	-0.033
Pb	0.559	0.005	0.834	0.291
Cd	0.538	-0.431	0.219	0.011
特征值	4.80	2.58	3.73	2.49
贡献率/(%)	40.03	21.49	31.10	20.76
累计贡献率/(%)	40.03	61.52	31.10	51.86

### 2.4 生态风险评估

所有渔港休渔期和捕捞作业期表层海水的  $HQ^i$  结果如下:  $0.96 \leq HQ^{Cu} \leq 7.45$ ;  $0.25 \leq HQ^{Zn} \leq 1.40$ ;  $0.10 \leq HQ^{Pb} \leq 10.34$ ;  $0.09 \leq HQ^{Cd} \leq 4.94$ ;  $HQ^{Hg} < 1$  和  $HQ^{As} < 1$ 。结果表明, Cu、Zn、Pb、Cd 是渔港需要潜在关注的重金属。在所有渔港中, 休渔期董砣子渔港和捕捞作业期天津中心渔港( $HQ^{Cu}=7.19, 7.45$ )、休渔期将军石渔港( $HQ^{Pb}=10.34$ )的  $HQ$  指数处于较高水平, 表明因海水接触造成的累计非致癌风险高, 应对其重点关注。

重金属生态风险指数(ERI)计算结果如图 2 所示。休渔期将军石渔港、董砣子渔港、锦州中心渔港和威海中心渔港表层海水 ERI 大于 1, 锦州中心渔港 ERI(2.05) 最高, 羊口中心渔港 ERI(0.5) 最低; 捕捞作业期的嘴东渔港和天津中心渔港表层海水 ERI 大于 1, 天津中心渔港 ERI(1.06) 最高, 威海中心渔港 ERI(0.54) 最低。结果表明, 锦州中心渔港、董砣子渔港、将军石渔港、嘴东渔港、天津中心渔港和威海中心渔港表层海水重金属处于低风险级别; 杏树中心渔港、羊口中心渔港、长岛中心渔港、红岛渔港和日照中心渔港的表层海水重金属处于无风险级别。

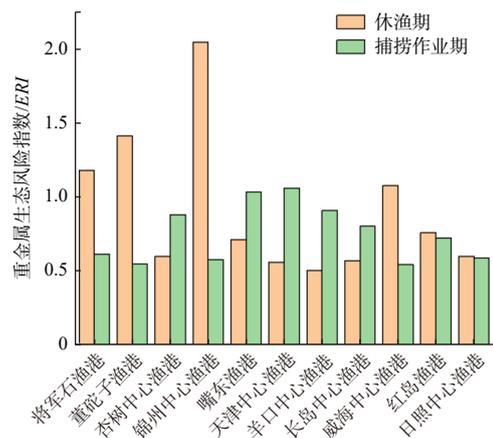


图 2 重金属生态风险指数(ERI)

Fig. 2 The value of the ecological risk index (ERI) of heavy metals

### 3 结论

(1)黄、渤海区沿海 11 个中心渔港表层海水中 Cu、Zn、Pb、Cd、Hg 和 As 浓度均值满足《海水水质标准》(GB3097—1997)四类标准, 休渔期 Cu、Zn、Pb、Cd、Hg 和 As 的浓度范围分别为 1.26 ~ 4.46  $\mu\text{g/L}$ 、4.10 ~ 22.72  $\mu\text{g/L}$ 、1.18 ~ 16.76  $\mu\text{g/L}$ 、0.54 ~ 7.80  $\mu\text{g/L}$ 、0.02 ~ 0.08  $\mu\text{g/L}$  和 0.02 ~ 0.86  $\mu\text{g/L}$ ; 捕捞作业期分别为 0.60 ~ 4.62  $\mu\text{g/L}$ 、4.92 ~ 10.61  $\mu\text{g/L}$ 、0.16 ~ 2.95  $\mu\text{g/L}$ 、0.14 ~ 2.95  $\mu\text{g/L}$ 、0.03 ~ 0.11  $\mu\text{g/L}$  和 0.16 ~ 1.37  $\mu\text{g/L}$ 。从分布来看, 黄海沿海中心渔港表层海水重金属浓度略低于渤海地区, 与我国东海地区(洋山港、象

山港和白马港)和南海地区(湛江港、新村港、水东港和东寨港)相比,黄、渤海区 Cu、Pb 和 Cd 浓度处于较高水平,Zn 和 Hg 浓度处于中等水平,As 浓度处于较低水平。

(2)本研究分析发现,休渔期和捕捞作业期 Zn 和 As 主要来自陆源,Cu 来自陆源和海源(船舶),表层海水中 Pb 浓度与大气沉降有关。为有效保护渔港环境,需要从渔港自身特点及重金属来源出发科学施策,河道型渔港需要严控上游来水水质,其余渔港水域环境改善则需与近岸海域环境质量改善统筹考虑。

(3)基于重金属浓度均值计算出的综合污染指数均处于自然本底范围;沿海中心渔港表层海水重金属生态风险指数(ERI)(0.84~1.45)都属于生态低风险和无风险类别,但 Cu、Zn、Pb 和 Cd 危害系数( $HQ^i$ )大于1,属于潜在关注指标,应予以关注。

**致谢:**感谢中国水产科学研究院黄海水产研究所杨茜、江涛、陈聚法、李秋芬、崔鸿武和张艳老师在实验设计、样品采集和数据分析方面给予的支持和帮助。

#### 参考文献:

- [1] 田琳,陈洪涛,杜俊涛,等.北黄海表层海水溶解态重金属的分布特征及其影响因素[J].中国海洋大学学报,2009,39(4):617-621.
- [2] 李玉.胶州湾主要重金属和有机污染物的分布及特征研究[D].青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所),2005.
- [3] 巩慧敏,刘永,肖雅元,等.近海海水和表层沉积物重金属污染与生态风险评价——以海南新村港为例[J].农业现代化研究,2018,39(4):700-708.
- [4] 孙钦帮,张冲,乌立国,等.广东红海湾表层沉积物重金属含量的空间分布特征与污染状况评价[J].生态环境学报,2017,26(5):843-849.
- [5] 国家发展改革委,农业农村部.全国沿海渔港建设规划(2018-2025年)[EB/OL].<https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/njs/sjdt/201805/W020191101565109783682.pdf>,2018-04-19.
- [6] 葛修军,吴少杰,吴建新.连云港港口附近海水中重金属的分布特征及其规律[J].淮海工学院学报:自然科学版,2010,19(2):89-92.
- [7] 杨妙峰.福安白马港海水、沉积物及水产生物体内重金属含量分布[J].福建水产,2006(4):27-31.

- [8] 牛显春,周建敏,熊德琴,等.水东港及其近岸海域食用水产品重金属污染及无公害评价[J].广西科学,2007,14(3):299-302.
- [9] 曹玲珑,王平,田海涛,等.海南东寨港重金属在多种环境介质中污染状况及评价[J].海洋通报,2013,32(4):403-407.
- [10] 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.
- [11] LI J S, CHEN G Q, HAYAT T, et al. Mercury emissions by Beijing's fossil energy consumption: based on environmentally extended input-output analysis[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 41: 1167-1175.
- [12] 宋永刚,吴金浩,邵泽伟,等.辽东湾近岸表层海水重金属污染分析与评价[J].渔业科学进展,2016,37(3):14-19.
- [13] 张晓举,赵升,冯春晖,等.渤海湾南部海域生物体内的重金属含量与富集因素[J].大连海洋大学学报,2014,29(3):267-271.
- [14] United States Environmental Protection Agency(US EPA). National recommended water quality criteria[R]. Washington: Office of Water, Office of Science and Technology, 2002.
- [15] 王金辉,秦玉涛,孙亚伟,等.象山港重点增殖区重金属残留量分布及污染源分析[J].海洋渔业,2005,27(3):225-231.
- [16] ESSLEMONT G. Heavy metals in seawater, marine sediments and corals from the Townsville section, Great Barrier Reef Marine Park, Queensland[J]. *Marine Chemistry*, 2000, 71(3/4): 215-231.
- [17] AYDIN ONEN S, KUCUKSEZGIN F, KOCAK F. Temporal and spatial biomonitoring of heavy metals in eastern Aegean coastal waters using *Amphibalanus amphitrite*[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(11): 2548-2556.
- [18] 崔昱.洋山港重金属与多环芳烃污染评价与相间分布研究[D].上海:上海海洋大学,2015.
- [19] 曲念东,田秀蕾,易志全,等.湛江港海水中总锌、总铬的含量变化与水质评价[J].海洋开发与管理,2011,28(11):69-73.
- [20] 战玉杰.渤海重金属污染状况及对典型浮游植物生长影响初步分析[D].青岛:中国海洋大学,2005.
- [21] 贺志鹏,宋金明,张乃星,等.南黄海表层海水重金属的变化特征及影响因素[J].环境科学,2008,29(5):1153-1162.
- [22] 刘金虎.莱州湾多相介质重金属污染特征及其在食物链(网)的传递与生物放大作用[D].青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所),2013.
- [23] 叶然,江再昌,郭清荣,等.洋山深水港区海域秋、冬季沉积物中重金属来源分析及生态风险评价[J].海洋通报,2015,34(1):76-82.
- [24] BIGGS T W, D'ANNA H. Rapid increase in copper concentrations in a new marina, San Diego Bay[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(3): 627-635.