

文章编号: 1674-5566(2020)05-0720-14

DOI:10.12024/jsou.20200202937

长江口中华鲟保护区附近海域重金属分布特征及生态风险评价

张建坤¹, 杨红¹, 王春峰¹, 陈锦辉^{2,3}, 吴建辉^{2,3}

(1. 上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306; 2. 上海市水生野生动植物保护研究中心, 上海 200092; 3. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306)

摘要: 为探究长江口中华鲟保护区附近水域的生态环境, 分析了表层海水及沉积物中重金属元素季节变化和空间分布特征, 并运用综合污染指数法和潜在生态风险指数法评价重金属污染程度与生态风险等级。结果表明: 2018 年研究水域海水中重金属 Hg、As、Cu、Pb、Cd、Cr 和 Zn 平均浓度为 3.852、1.948、6.362、4.542、0.294、6.201 和 44.56 $\mu\text{g/L}$, Hg、Cu、Pb 和 Zn 均超出国家一类海水水质标准; 沉积物中重金属 Hg、As、Cu、Pb、Cd、Cr 和 Zn 平均浓度为 0.339、14.815、5.055、3.436、0.133、12.667 和 75.578 mg/kg , 仅 Hg 超出了海洋沉积物质量一类标准。春夏季表层海水中重金属浓度较高, 秋冬季沉积物中重金属浓度较高, 这主要与入海径流的季节变化有关。空间分布显示, 中华鲟保护区核心区的重金属浓度较高, Hg、As 和 Zn 元素均有明显富集趋势。海水中重金属综合污染指数大于 5, 处于严重污染水平; 沉积物重金属综合污染指数小于 5, 处于低污染水平。7 种重金属元素的潜在生态风险系数强弱为 $\text{Hg} > \text{Cd} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cr}$, 除 Hg 处于很强生态风险水平外, 其余元素均处于低生态风险水平, 重金属综合潜在生态风险指数处于强风险水平。

关键词: 中华鲟保护区; 海水及沉积物; 重金属; 污染评价; 潜在生态风险

中图分类号: X 55 **文献标志码:** A

长江口作为中国第一大河口, 区域内人口稠密工业发达、水域环境复杂、长江干流水利工程繁重、船舶航行频繁等诸多条件决定了长江口水环境中重金属含量与分布状况的复杂多变^[1]。同时, 长江口位于长江等多水系入海的咸淡水交界处, 温度和盐度变化大, 营养盐含量较高^[2-3], 饵料生物充足, 底栖生物多样性丰富, 是中华鲟 (*Acipenser sinensis*) 等国家一级重点保护动物江海洄游的唯一通道^[4-5], 每年的 6—8 月, 成年鲟鱼经东海于长江口聚集准备溯江洄游; 翌年 5 月, 仔鱼到达长江口并主要在崇明岛东北部的滩涂索饵肥育, 约 3 个月后进东海^[6-7], 故长江口中华鲟自然保护区亦是中华鲟仔稚幼鱼降海洄游入海前生理适应调节和索饵肥育的重要场所和栖息地^[8-9]。然而, 近几十年来长江中大型水利工程建设、长江航运、渔业捕捞和水体污染对中华鲟造成了巨大的威胁, 种群衰减趋势严重, 洄

游至产卵场的中华鲟繁殖群体呈现出数量下降, 雌雄比例失衡, 繁殖规模减小, 产卵活动延迟等现象^[10]。中华鲟自然保护区及其周边水域环境的污染因素众多, 其中重金属污染是一个重要因素。重金属污染物具有来源广、生物毒性作用明显、难降解等特点, 可在海水、沉积物和海洋生物中循环迁移^[11-12], 并通过食物链传递进入人体, 危害人体健康^[13-15]。进入水体的重金属污染物不仅会沉积于沉积物中^[16-17], 亦在生物体内富集从而对底栖生物和鱼类造成急性或慢性毒害作用; 而赋存于沉积物中的重金属在吸附解析作用下不断向上覆水体释放污染物, 造成水体的二次污染, 进而影响生态环境的平衡和功能^[18-20]。

近年来, 国内外学者针对近海沉积物重金属污染状况已开展较多研究, 但针对长江口中华鲟保护区附近水域重金属的污染特征以及水体中重金属对中华鲟等生物的生态风险分析相对较

收稿日期: 2020-02-24 修回日期: 2020-05-04

基金项目: 海洋公益性行业科研经费专项(201205010); 长江口中华鲟保护区及附近海域重金属监测项目(D-8006-18-0040)

作者简介: 张建坤(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为环境科学与工程。E-mail: 996181867@qq.com

通信作者: 杨红, E-mail: hyang@shou.edu.cn

少,但重金属污染对中华鲟等海洋生物的影响正逐步加重。陈素兰等^[21]对长江江苏段水生生物调查发现,部分鱼类肌肉中 Pb 含量高达 0.5 mg/kg;张慧婷等^[22]对长江口中华鲟幼鱼饵料生物的研究发现,调查生物均受到重金属污染。因此,本文依托上海市水生野生动植物保护研究中心提供的长江口中华鲟保护区附近水域调查数据,分析讨论了 2018 年春季、夏季、秋季和冬季海水及沉积物中 Hg、As、Cu、Pb、Cd、Cr 和 Zn 等 7 种重金属的分布特征和污染水平,以及其对海洋生

物的潜在生态危害水平,以期更好地反映该水域重金属污染现状,为该水域的环境保护提供数据支撑。

1 材料与方 法

1.1 研究区域

研究区域为长江口中华鲟自然保护区及其附近水域,区域内共布设 14 个站位,采样点位置如图 1 所示,中华鲟保护区按功能性划分为核心区、缓冲区和实验区。

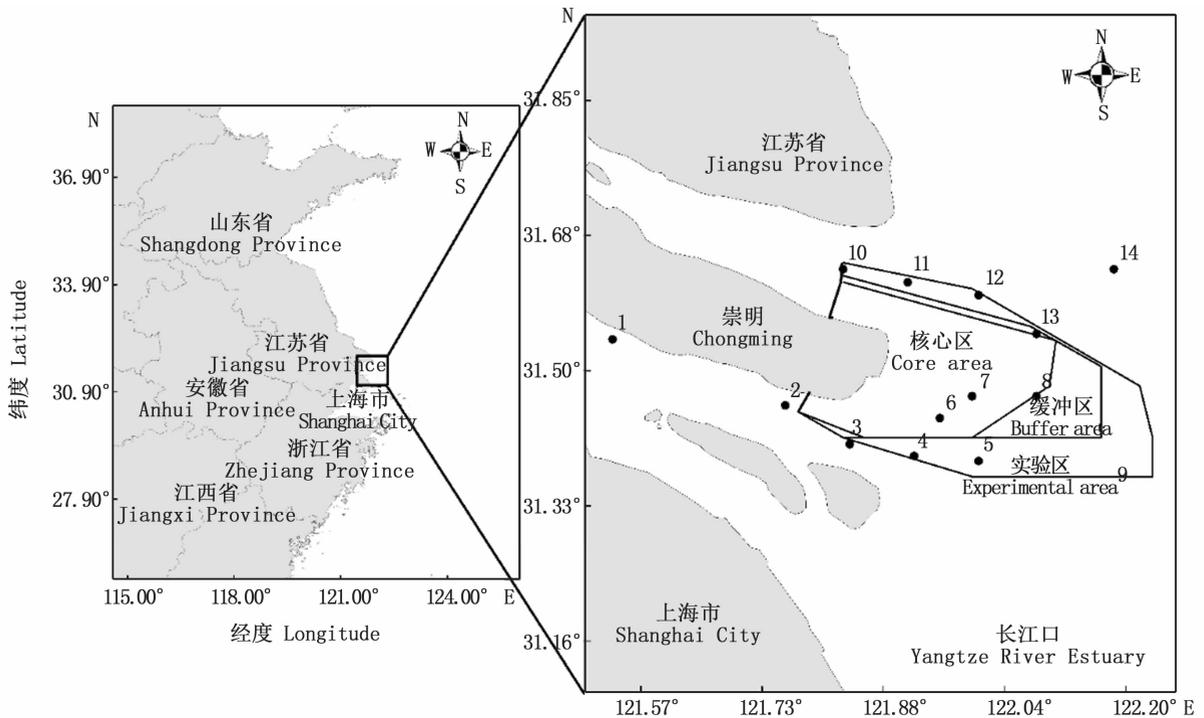


图 1 长江口中华鲟保护区附近水域重金属样品采样站位图

Fig.1 Site map of heavy metal sampling stations in the adjacent sea area of *Acipenser sinensis* reserve in the Yangtze River Estuary

1.2 样品采集与处理

分别于 2018 年 2 月(冬季)、5 月(春季)、8 月(夏季)和 11 月(秋季)采集了长江口中华鲟保护区附近水域水样和沉积物样品,采集各站位表层海水和表层沉积物样品各 14 个。水样经 0.45 μm 的微孔滤膜过滤,并用硝酸酸化固定至水样 pH 小于 2.0,保存于聚乙烯瓶中封口冷藏;沉积物样装于封口袋于冰箱中冷藏保存^[23],实验时将样品置于 80 °C 烘箱中烘干,研磨过筛(160 目)后备用。所有经处理的水样和沉积物样均依据《海洋监测规范》(GB17378—2007)^[24]中规定的方法

进行测定分析。

1.3 重金属评价方法

1.3.1 重金属污染评价方法

利用水质质量指数法评价海水不同点位的重金属污染物超标情况^[25],其计算公式如下:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \tag{1}$$

$$P_d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \tag{2}$$

式中: P_i 为单个重金属 i 的污染指数; P_d 为海水重金属综合污染指数; C_i 为该重金属 i 的实测含

量; S_i 为重金属 i 的评价标准含量,此处选用国家一类海水水质标准。海水中重金属的污染水平划分为 5 个等级:污染指数 < 1 ,无影响;污染指数为 $1 \sim 2$,轻微影响;污染指数为 $2 \sim 3$,中等影响;污染指数为 $3 \sim 5$,较强影响;污染指数 > 5 ,严重影响。

根据国家海洋沉积物质量标准(GB18668—2002),利用单因子污染指数法评价沉积物不同点位的单个重金属污染情况以及多个重金属综合污染情况^[26],计算方法如下:

$$C_f = C_i / C_n \quad (3)$$

$$W_d = \sum_{i=1}^n C_f \quad (4)$$

式中: C_f 为单个重金属 i 的污染指数; W_d 为沉积物重金属的综合污染指数; C_i 为重金属 i 的实测含量; C_n 为重金属 i 的参照值,以国家一类沉积物标准为参照。沉积物中重金属的污染水平等级划分如表 1 所示。

表 1 沉积物重金属污染评价等级

Tab.1 Assessment grade of heavy metal pollution in sediment

C_f	W_d	污染等级 Class of pollution
$C_f < 1$	$W_d < 5$	低污染
$1 < C_f < 3$	$5 < W_d < 10$	中等污染
$3 < C_f < 6$	$10 < W_d < 20$	较高污染
$C_f > 6$	$W_d > 20$	高污染

1.3.2 沉积物重金属生态风险评价

根据瑞典学者 HAKANSON^[26] 提出的潜在生态风险指数法分析评价研究区域重金属的生物风险等级,其计算公式如下:

$$E_f^i = T_f^i \times C_i / C_{0i} \quad (5)$$

$$R_1 = \sum_{i=1}^n E_f^i \quad (6)$$

式中: E_f^i 为研究区域单种重金属的潜在生态危害系数; R_1 为研究区域多个重金属的综合潜在生态危害指数; T_f^i 、 C_{0i} 分别为第 i 种重金属的毒性响应参数和背景参照值,Hg、As、Cu、Pb、Cd、Cr 和 Zn 毒性系数分别为 40、10、5、5、30、2 和 1;背景值选取上海市土壤背景值,依次为 0.080 9、8.90、26、24.5、0.124 1、61、79.9 mg/kg^[27]; C_i 为第 i 种重金属的实测浓度。根据 E_f^i 和 R_1 的值,将沉积物重金属的潜在生态危害由低到高分 5 个等

级^[28],如表 2 所示。

表 2 重金属污染程度与潜在生态风险指标的关系
Tab.2 The relation between the contamination degree and potential ecological risk

E_f^i	生态风险 Ecological risk	R_1	生态风险 Ecological risk
$E_f^i < 40$	低	$R_1 < 110$	低
$40 \leq E_f^i < 80$	中等	$110 \leq R_1 < 220$	中等
$80 \leq E_f^i < 160$	强	$220 \leq R_1 < 440$	强
$160 \leq E_f^i < 320$	很强	$R_1 \geq 440$	极强
$E_f^i \geq 320$	极强		

1.4 数据处理

实验数据通过 Excel 2016、SPSS 24.0 软件统计分析海水和沉积物中重金属的含量变化,使用 Origin 2017 软件绘制重金属季节变化箱体图,计算各季节所有站位重金属的范围、中值及平均值;使用 Surfer 8.0 软件以夏季所有站位重金属数据绘制重金属空间分布等值线图。

2 结果与分析

2.1 重金属季节变化特征

2.1.1 表层海水重金属季节变化特征

对表层海水中重金属含量在各季节变化进行分析,结果显示表层海水中重金属 As 和 Pb 具有相同的变化规律,均为夏季含量最高、冬季最低;Zn 和 Cr 含量表现为春夏季高于秋冬季,Cd 含量春季较高,后其含量呈下降趋势;而 Hg 和 Cu 含量表现为冬季最高,夏季最低,可能存在包括大气沉降等外源输入。综合分析,春季、夏季、秋季和冬季重金属的总体浓度分别为 72.809、58.667、41.153 和 72.956 $\mu\text{g/L}$,春夏季海水中重金属总体浓度相对较高(图 2)。

2.1.2 表层沉积物中重金属季节变化特征

长江口中华鲟保护区附近水域表层沉积物中重金属含量季节变化分析显示,重金属含量均表现为秋冬季高于春夏季(图 3)。时序变化上,Hg 和 Cu 具有相似的变化趋势,且在冬季时期浓度最高;As 和 Pb 亦具有相似的变化趋势,均在秋季浓度最高,Cd 和 Cr 在冬季浓度最高,Zn 在秋季浓度最高。

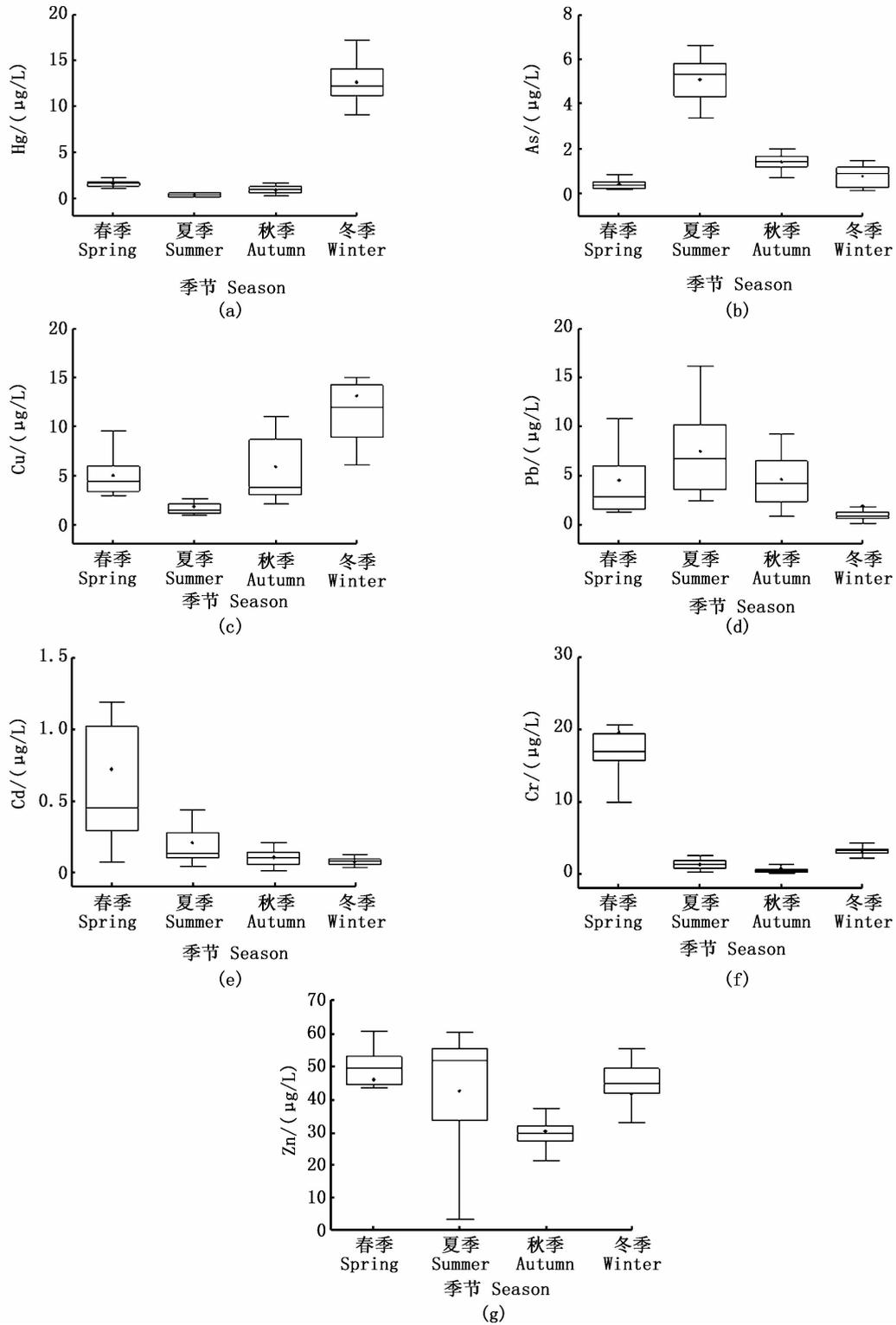


图 2 长江口中华鲟保护区附近水域表层海水重金属含量季节变化特征
 Fig. 2 Seasonal variation of heavy metal content in surface seawater near the *Acipenser sinensis* reserve in the Yangtze River Estuary

2.2 重金属空间分布特征

2.2.1 表层海水重金属空间分布特征

长江口中华鲟保护区附近水域表层海水重

金属含量空间分布差异较为明显(图 4),近岸海域表层海水中 Hg、As、Cu 和 Zn 的含量高于外海海域,由口内向外呈梯度递减趋势,说明这 4 种元

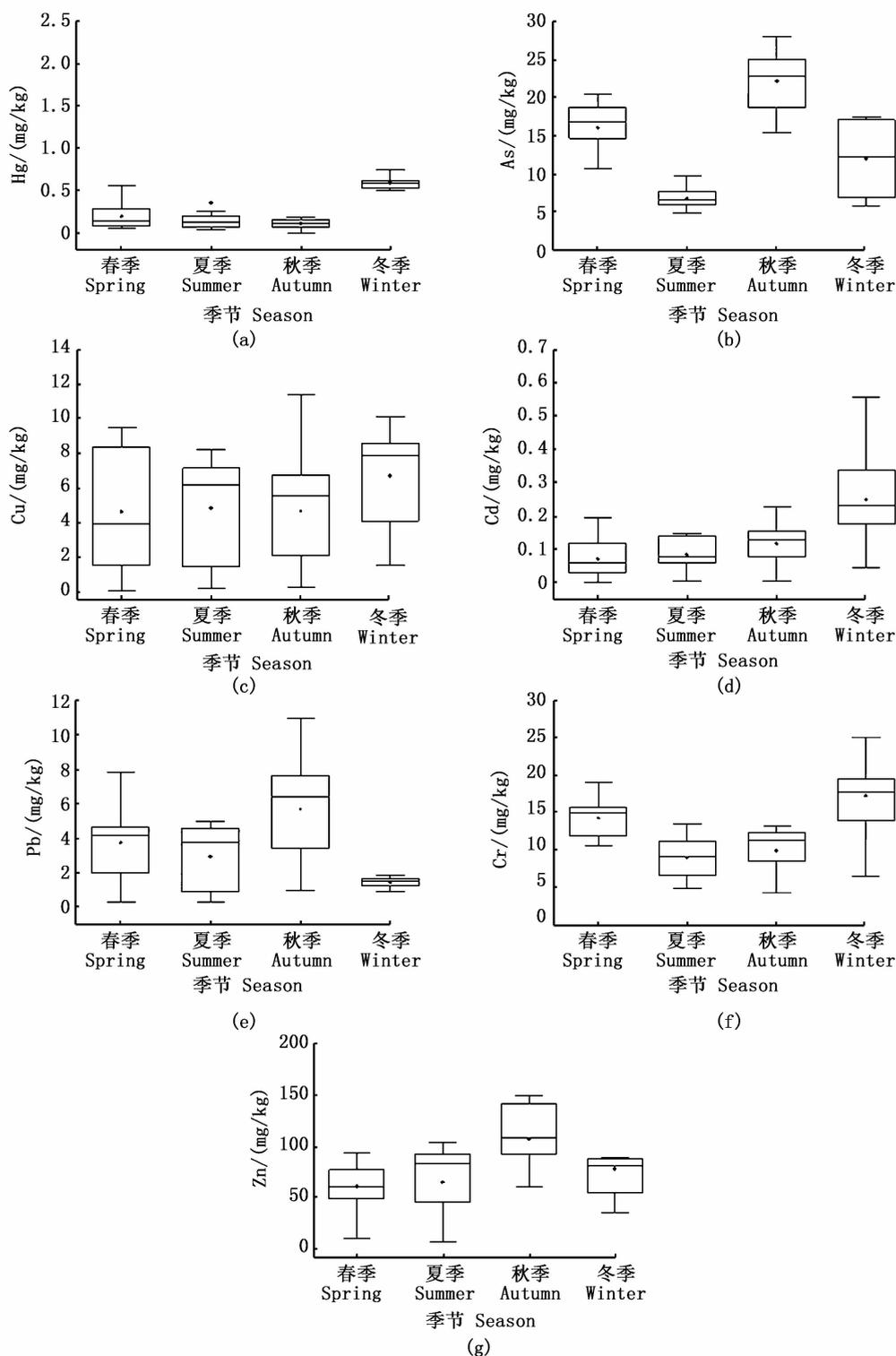


图3 长江口中华鲟保护区附近水域表层沉积物重金属含量季节变化特征
 Fig. 3 Seasonal variation of heavy metal content in surface sediments near the *Acipenser sinensis* in the Yangtze River Estuary

素以陆源输入为主,长江径流、沿岸排污口以及城市垃圾是其主要污染源。Cd、Cr 和 Pb 元素含量具有明显的低-高-低分布趋势,在离岸带出现

高值区,这主要是因为此 3 种元素在受陆源污染的同时,大气沉降和船舶航行等也是其重要污染源。从区域分布来看,核心区 Hg、As 和 Zn 含

量较高,出现高值富集现象;此外,保护区水域 Cd 和 Cr 的含量也较高,其他元素在长江口口内和保护区南北两侧出现高值区。综合分析,中华鲟保

护区水域重金属含量表现为核心区 > 缓冲区 > 实验区,并由近岸向外海扩散迁移,在离岸带形成条带状高值区,后呈逐渐下降趋势。

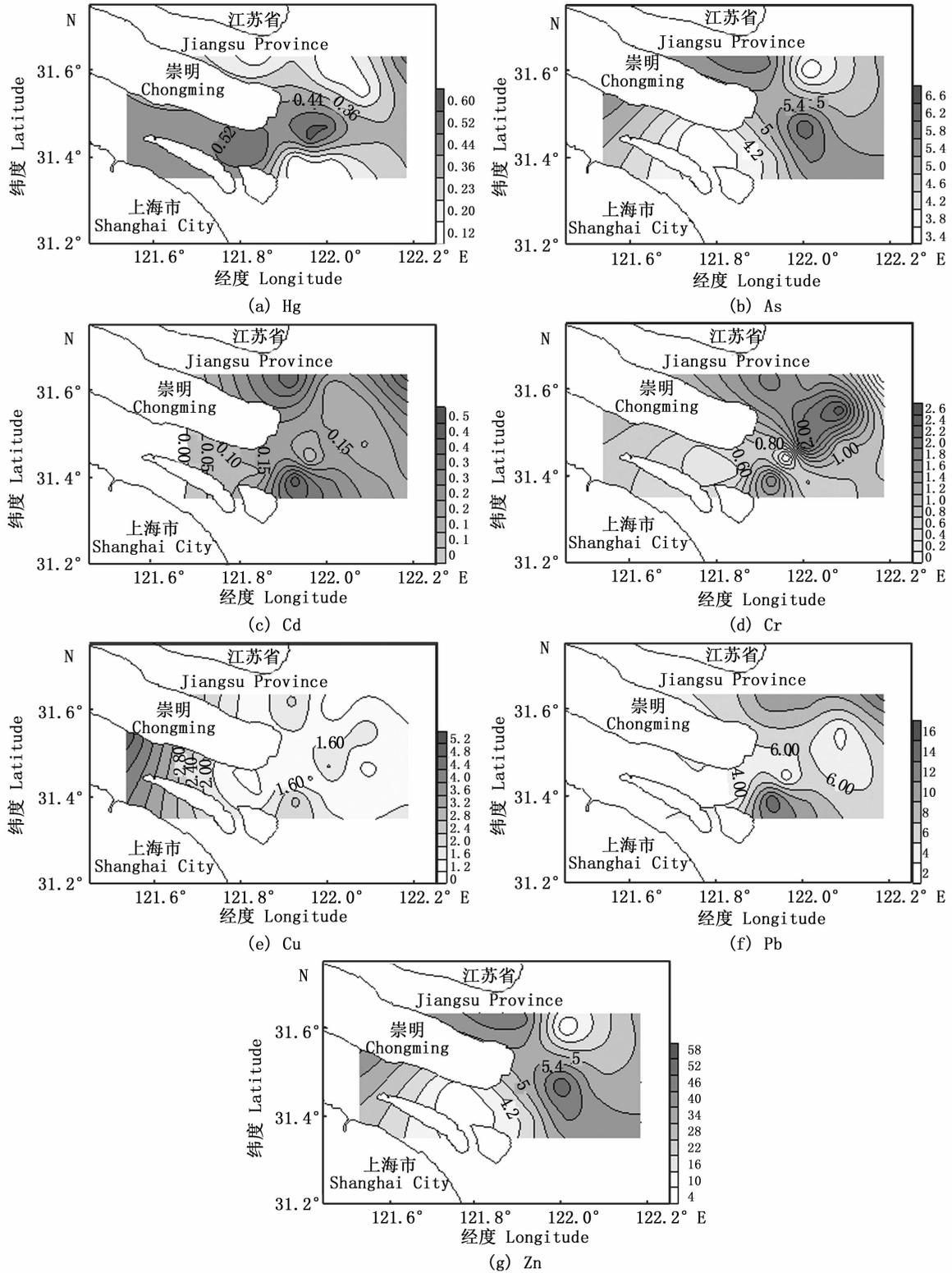


图 4 长江口中华鲟保护区附近水域表层海水重金属空间分布图
 Fig. 4 Spatial distribution of heavy metals in surface seawater near the *Acipenser sinensis* reserve in the Yangtze River Estuary

2.2.2 表层沉积物重金属空间分布特征

长江口中华鲟保护区附近水域表层沉积物中重金属含量的分布特性显示,As、Cu、Pb 和 Cd 元素在研究区南部含量较高,出现明显的高值区,且等值线分布较为密集,低值区主要分布在研究区北部;Hg 含量在南部及口内近岸区域出现显著的高值区,且向外呈明显带状递减分布趋势,降低幅度较大;Cr 和 Zn 高值区出现在研究区北部近岸海域,在研究区南部出现低值区(图 5)。陈彬等^[29]的研究亦发现,长江口沉积物中重金属 Cu 呈近岸高、远岸低,北部低、南部高的特点, Cr 和 Zn 呈近岸高、远岸低,北部高、南部低的特点,与本研究结果一致。总体来说,表层沉积物中重金属含量分布东西方向上呈现近岸高远海低,由近岸向远海逐级递减且由舌状分布逐渐变为带

状分布;南北方向上呈现南部高北部低,由南向北表现为低-高-低的变化趋势^[30]。而保护区内核心区重金属含量亦较高,As、Cd、Cu 和 Pb 均有聚积趋势,这可能是因为该区域是南北支水流汇合处,容易导致重金属的吸附沉积。

表 3 显示长江口与国内其他河口区域沉积物重金属含量的对比分析,与珠江口对比发现,研究区域重金属含量均明显偏低,而与其他河口区域对比发现 Hg 和 Zn 含量均较高。以上事实可能说明,研究区域重金属 As、Cu、Pb、Cr 和 Cd 主要受长江流域陆源物质的影响,而 Hg 和 Zn 除了受陆源物质的影响外,还与周围工厂分布、码头和电子制造业等有很大关系。相对而言,中华鲟保护区水域表层沉积物中重金属含量较低,污染程度较轻。

表 3 本研究区域与其他河口沉积物重金属含量对比

Tab.3 The comparison of heavy metal contents in sediments of the study area and other estuaries

区域 Area	浓度 Concentration/(mg/kg)						
	Hg	As	Cu	Pb	Cd	Cr	Zn
本研究 This research	0.353	6.79	4.88	2.92	0.085	9.08	65.03
长江口 ^[31] Yangtze River Estuary	0.131	7.64	4.58	9.35	0.063	-	38.21
黄河口 ^[32] Yellow River Estuary	0.044	11.60	22.70	20.50	0.105	21.10	23.90
珠江口 ^[33] Pearl River Estuary	-	93.20	37.40	37.00	0.260	41.10	78.50
土壤背景值 ^[34] Soil background value	0.200	15.00	30.00	25.00	0.500	60.00	80.00

2.3 重金属污染评价

2.3.1 表层海水重金属污染评价

长江口中华鲟保护区附近水域表层海水中重金属 Hg、Cu、Pb、Zn、Cd、Cr 和 As 元素年平均含量分别为 3.852、6.362、4.542、44.56、0.294、6.201 和 1.948 $\mu\text{g/L}$, Hg、Cu、Pb 和 Zn 均超出国家一类海水水质标准。由于研究区域属于中华鲟自然保护区和渔业养殖区,根据渔业水质标准, Hg、Pb、Zn、Cu 的安全浓度为 0.5、50、100 和 10 $\mu\text{g/L}$, Hg 和 Cu 均有超标现象。表层海水中

重金属水质质量指数法污染评价显示(表 4),海水中 7 种重金属元素的污染程度依次为 $\text{Hg} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Cr} > \text{As}$,相较于其它元素, Hg、Pb 和 Zn 的污染指数较大,分别处于严重污染影响、较强污染影响和中等污染影响水平; Hg 和 Cu 在秋冬季时污染指数较大,春夏季相应较低,其它元素均为春夏季污染指数较大,秋冬季较小。海水综合污染指数冬季 $>$ 春季 $>$ 秋季 $>$ 夏季,冬季和春季为严重污染,夏秋季为中等污染,年均值为 12.194,说明海水处于严重污染水平。

表 4 表层海水中重金属污染指数(P_i)和综合污染指数(P_d)

Tab.4 Pollution index (P_i) and comprehensive pollution index (P_d) of heavy metals in seawater

季节 Season	P_i							P_d
	Hg	As	Cu	Pb	Cd	Cr	Zn	
春季 Spring	30.906	0.022	0.984	4.420	0.721	0.392	2.494	5.667
夏季 Summer	7.218	0.254	0.352	7.367	0.216	0.027	2.500	2.520
秋季 Autumn	18.232	0.071	1.159	4.503	0.162	0.013	1.592	3.647
冬季 Winter	251.840	0.040	2.595	1.877	0.078	0.064	2.327	36.941

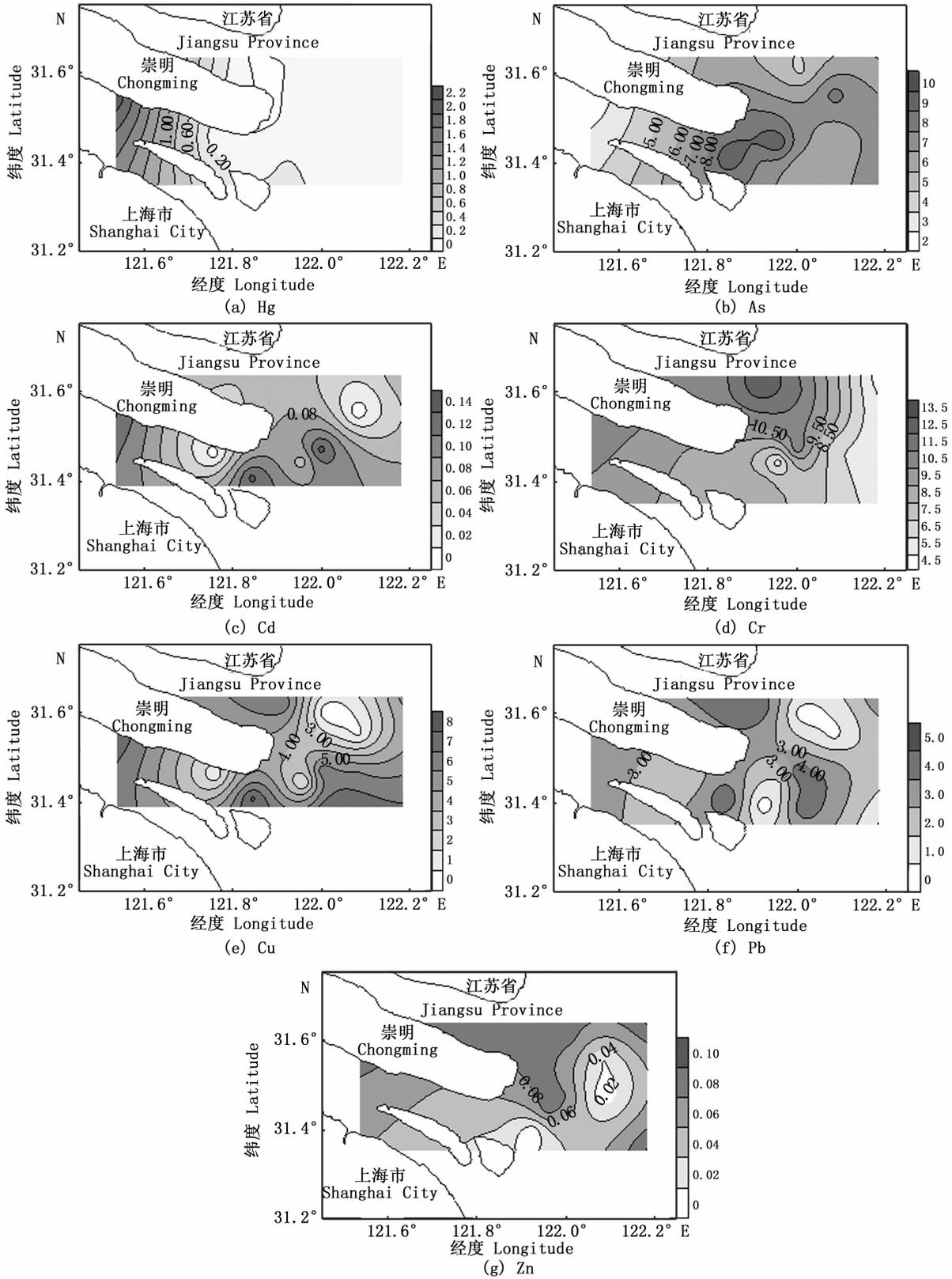


图 5 长江口中华鲟保护区附近水域表层沉积物重金属含量空间分布图
 Fig. 5 Spatial distribution of heavy metals in surface sediments near the *Acipenser sinensis* reserve in the Yangtze River Estuary

2.3.2 表层沉积物重金属污染评价

沉积物是重金属的主要聚集地,大量重金属经过吸附和絮凝作用沉降于沉积物中^[35],长江口中华鲟保护区附近水域表层沉积物中重金属 Hg、As、Cu、Pb、Cd、Cr 和 Zn 的年平均含量为 0.339、14.815、5.055、3.436、0.133、12.667 和 75.578 mg/kg,仅 Hg 超出了海洋沉积物质量一类标准。而沉积物中重金属单因子污染指数评价结果显示(表 5),沉积物中 7 种重金属元素污染程度依

次为 Hg > As > Zn > Cd > Cr > Cu > Pb,其中,Hg 的污染指数值较高,处于中等污染等级,其余元素均为低污染水平,沉积物中重金属污染基本呈现秋冬季高于春夏季;沉积物重金属综合污染指数冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季,各季节重金属均处于低污染状态,年均值亦小于 5,处于低污染水平。综上,沉积物中重金属污染较轻,环境质量良好。

表 5 表层沉积物中重金属污染指数(C_f)和综合污染指数(W_d)

Tab. 5 Pollution index (C_f) and comprehensive pollution index (W_d) of heavy metals in sediment

季节 Season	C_f							W_d
	Hg	As	Cu	Pb	Cd	Cr	Zn	
春季 Spring	0.975	0.808	0.133	0.062	0.144	0.179	0.406	2.557
夏季 Summer	1.767	0.340	0.140	0.049	0.169	0.114	0.434	2.324
秋季 Autumn	0.543	1.114	0.134	0.095	0.235	0.125	0.712	2.657
冬季 Winter	2.937	0.602	0.193	0.024	0.500	0.216	0.517	4.522

通过对调查区域表层沉积物中重金属潜在生态风险进行评价,得到重金属潜在生态风险系数和综合潜在生态风险指数变化趋势图(图 6)。由单个重金属潜在生态风险系数评价结果可知,表层沉积物中各重金属的潜在生态风险强弱依次为 Hg > Cd > As > Cu > Zn > Pb > Cr。其中,Hg 的年平均潜在生态风险指数为 172.96,达到了很强生态风险水平,Cd 元素年平均潜在生态风险系数为 32.83,属于低生态风险水平,个别站位的潜在生态风险等级处于中等水平。As、Cu、Pb、Cr 和 Zn 年平均潜在生态风险系数分别为 19.146、1.737、0.859、0.415 和 1.179,且各站位风险系数均小于 40,均处于低生态风险水平。重金属综合潜在生态风险指数变化范围为 111.52 ~ 471.40,处于中等至极强生态风险水平,年平均综合风险指数为 225.43,处于强生态风险等级。区域分布显示,重金属 As 在研究区中部潜在生态风险系数较高,在保护区核心区域具有明显的高值区,重金属 Cd、Cu 和 Pb 潜在生态风险系数在研究区北部和南部均较高,在保护区实验区亦较高,而 Cr 和 Zn 在研究区北部潜在生态风险较高,向南呈递减趋势,核心区的生态风险水平高于其它区域;Hg 在长江口口内的潜在生态风险水平较高,在保护区附近生态风险水平相对较低。各区域重金属综合潜在生态风险表现为核心区 > 缓冲区 > 实验区,综合潜在生态风险在保护区南部和

北部均达到了强和极强生态风险水平,而保护区内处于中等以下水平,且呈现由近岸向外海、由北部向南部逐渐降低趋势。

3 讨论

长江口中华鲟保护区附近水域重金属浓度年际变化较大的主要原因可能是入海径流具有明显的季节性,春夏季为丰水期,长江和黄浦江等径流量较大,一方面带来大量的陆源污染物,加大重金属的聚集;另一方面,由于春夏季水动力条件较为强烈,较大的径流量冲刷表层沉积物,导致泥沙再悬浮使重金属重新释放进入水体,从而造成海水中重金属含量相对较高^[36-37];而秋冬季为枯水期,径流较小,较弱的水动力条件下重金属易于富集而沉积于沉积物中,导致重金属浓度升高。根据重金属污染评价和潜在生态风险指数评价可知,相对于污染指数,Cd 和 As 的生态风险排序相对上升,Zn 和 Pb 的排序相对下降,这说明 Cd 和 As 浓度变化幅度较大,沉积物对 Cd 和 As 的吸附性能更强,则其从沉积物和悬浮体中向水体迁移造成水体二次污染的风险更高,尤其是在沉积物发生再悬浮或者周围环境条件发生变化时,其向水体中迁移程度和迁移速度都可能发生重要变化,这与董爱国等^[38]的研究基本一致。从元素差异来看,Hg 的高值区主要出现在长江口南部口内区域,其他元素高值区相对

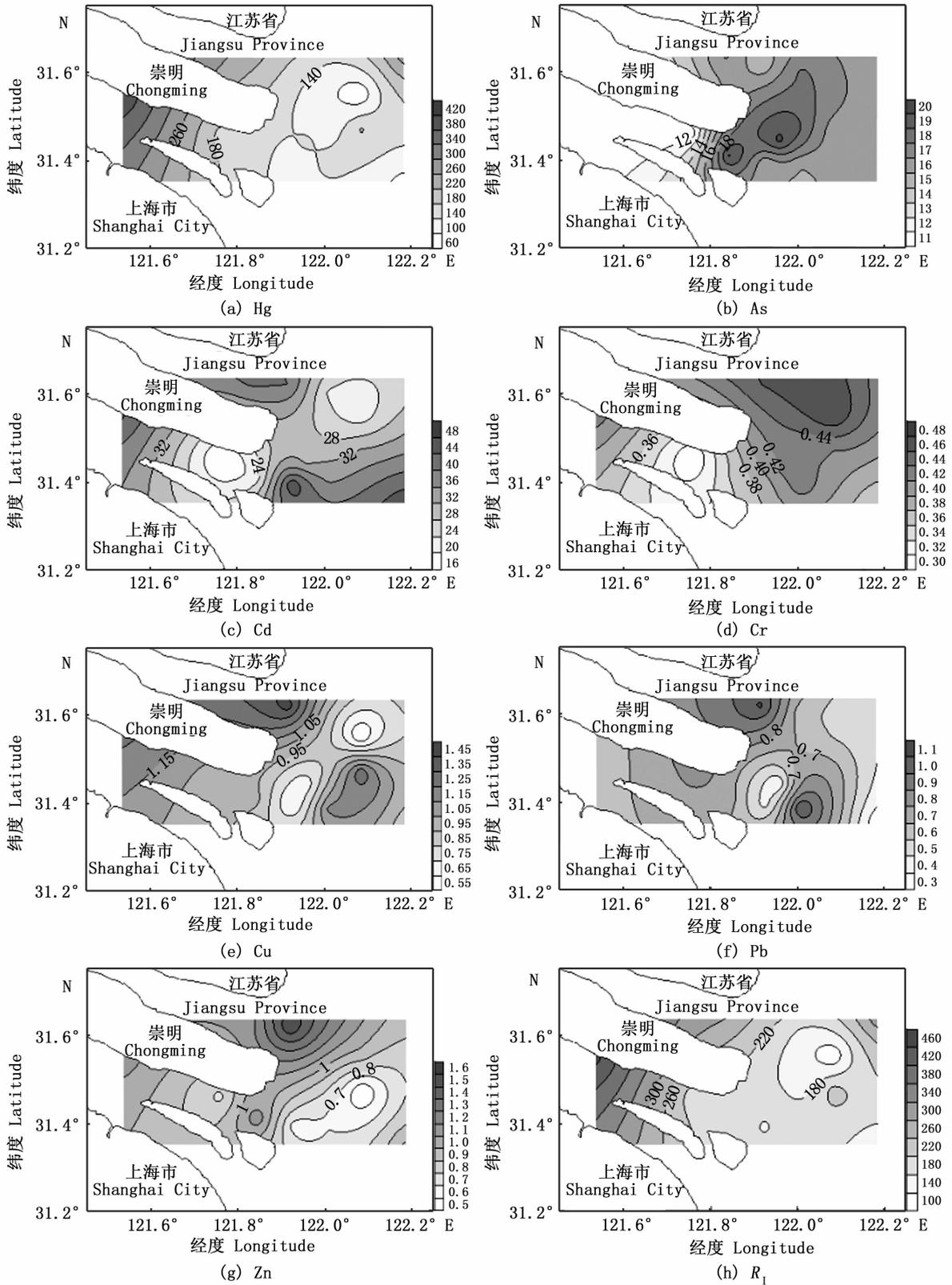


图 6 长江口中华鲟保护区附近水域重金属潜在生态风险指数分布图

Fig. 6 Distribution of potential ecological risk index of heavy metals in the sea area near the *Acipenser sinensis* reserve in the Yangtze River Estuary

集中在口外和北部附近,一方面因为长江口南支附近区域分布有上海市的两个主要排污口(即吴淞口和南区排污口),带来大量重金属^[39];另一方面可能由于Hg与沉积物中残渣晶格部分有较强结合性能^[40],更易随水流下降沉积。重金属生物毒性实验研究表明,Cu对中华鲟幼鱼的安全浓度为 $2.17\ \mu\text{g/L}$ ^[41],而高浓度重金属Cu($0.89\ \mu\text{g/L}$)和Pb($800\ \mu\text{g/L}$)长期胁迫下中华鲟幼鱼生长出现抑制,Cu主要在中华鲟幼鱼肝脏和消化道进行累积,Pb主要在骨和肌肉中积累最高^[42-43]。对中华鲟幼鱼主要饵料生物研究表明,重金属Hg($0.047\ \mu\text{g/L}$)、Cu($0.062\ \mu\text{g/L}$)和Cd($3.3\ \mu\text{g/L}$)均在其体内存在严重积累问题,且鱼虾等生物重金属受污呈加重趋势^[22];而对饵料生物长江口纹缟虾虎鱼(*Tridentiger trionocephalus*)的研究发现,Cu、Zn和Pb对早期仔鱼的安全浓度分别为10、136和167 $\mu\text{g/L}$ ^[44],饵料生物受污严重,均会通过食物链的富集传递对中华鲟幼鱼构成威胁。以上信息说明,长江口邻近水域重金属Hg的危害性较大,为该区域主要的污染因子,应该控制其输入,加大污染治理力度,防止其危害进一步加剧。其次,Cu和Cd的生态危害性亦有加剧趋势,亦应得到重视。从区域差异来看,Cu、Pb、Cr、Zn、As和Cd的污染指数和潜在生态风险指数在研究区北部和保护区内泥质区出现高值区,而口内区域高于口门和口外区域,这与海水和沉积物中重金属的含量分布相一致。研究水域南部和北部区域潜在生态危害较严重,是因为其属于近岸区域,陆源输入和人为活动较为剧烈,重金属浓度较高,污染较重所致;而中华鲟保护区内重金属污染较重,生态风险水平较高是因为其处于长江口南支和北支的交汇处,不仅带来大量重金属,而且其水动力条件较弱,重金属的稀释作用较低,加重了沉积物对重金属的富集。

参考文献:

[1] 黄厚见,平仙隐,李磊,等. 春、夏季长江口海水、沉积物及生物体中重金属含量及其评价[J]. 生态环境学报, 2011, 20(5): 898-903.
HUANG H J, PING X Y, LI L, et al. Concentrations and assessment of heavy metals in seawater, sediments and aquatic organisms at Yangtze River Estuary in spring and summer[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20

(5): 898-903.
[2] 全为民,沈新强. 长江口及邻近水域渔业环境质量的现状及变化趋势研究[J]. 海洋渔业, 2004, 26(2): 93-98.
QUAN W M, SHEN X Q. Research on present condition and change tendency of fisheries environmental quality in the Changjiang River estuary and adjacent East China Sea[J]. Marine Fisheries, 2004, 26(2): 93-98.
[3] 沈新强,晁敏,全为民,等. 长江河口生态系现状及修复研究[J]. 中国水产科学, 2006, 13(4): 624-630.
SHEN X Q, CHAO M, QUAN W M, et al. The current situation and restoration research of the Yangtze River estuarine ecosystem [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2006, 13(4): 624-630.
[4] 张玉平,孙振中,林惠山,等. 长江河口区渔业水域水质分析与评价[J]. 水产科技情报, 2012, 39(5): 230-233.
ZHANG Y P, SUN Z Z, LIN H S, et al. Analysis and evaluation of water quality in fishery waters of the Yangtze River Estuary [J]. Fisheries Science & Technology Information, 2012, 39(5): 230-233.
[5] 房敏,蔡露,王从锋,等. 长江珍稀鱼类中华鲟物种特性及资源保护[J]. 生态学杂志, 2014, 33(4): 1121-1127.
FANG M, CAI L, WANG C F, et al. Species characteristics and resource protection of Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis*, the rare fish in the Yangtze River: A review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(4): 1121-1127.
[6] ZHUANG P, ZHAO F, ZHANG T, et al. New evidence may support the persistence and adaptability of the near-extinct Chinese sturgeon[J]. Biological Conservation, 2016, 193: 66-69.
[7] 庄平,刘健,王云龙,等. 长江口中华鲟自然保护区科学考察与综合管理[M]. 北京: 海洋出版社, 2009.
ZHUANG P, LIU J, WANG Y L, et al. The Yangtze River estuary nature reserve for Chinese sturgeon: Scientific studies and management[M]. Beijing: China Ocean Press, 2009.
[8] 丁骏,吕忻,陈美榕,等. 上海近海生物栖息地保护和管理工作探索[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(s1): 419-425, 435.
DING J, LYU X, CHEN M R, et al. Marine habitat protection and management in Shanghai Coastal Area [J]. Environmental Science and Technology, 2015, 38(s1): 419-425, 435.
[9] 王春峰,陈锦辉,黄硕琳,等. 长江口中华鲟保护区生态环境初步评价[J]. 上海海洋大学学报, 2010, 19(5): 674-678.
WANG C F, CHEN J H, HUANG S L, et al. Preliminary evaluation of Yangtze Estuarine nature reserve for Chinese Sturgeon[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2010, 19(5): 674-678.
[10] 孙丽婷. 长江口中华鲟幼鱼的生长食性和遗传多样性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
SUN L T. Growth, food composition and genetic diversity of

- juvenile Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) in the Yangtze Estuary[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018.
- [11] 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.
- HE Z P, SONG J M, ZHANG N X, et al. Variation characteristics and controlling factors of heavy metals in the South Yellow Sea Surface Seawaters [J]. Environmental Science, 2008, 29(5): 1153-1162.
- [12] 周笑白, 梅鹏蔚, 彭露露, 等. 渤海湾表层沉积物重金属含量及潜在生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2015, 24(3): 452-456.
- ZHOU X B, MEI P W, PENG L L, et al. Contents and potential ecological risk assessment of selected heavy metals in the surface sediments of Bohai Bay [J]. Ecology and Environment Sciences, 2015, 24(3): 452-456.
- [13] HILLER E, JURKOVIČ L, ŠUTRIEPA M. Metals in the surface sediments of selected water reservoirs, Slovakia[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2010, 84(5): 635-640.
- [14] PRUDEN A. Balancing water sustainability and public health goals in the face of growing concerns about antibiotic resistance[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(1): 5-14.
- [15] 杨妙峰, 郑盛华, 席英玉, 等. 福建东山湾海水中溶解态重金属平面分布及影响因素初探[J]. 海洋学研究, 2016, 34(2): 75-82.
- YANG M F, ZHENG S H, XI Y Y, et al. The horizontal distribution and affecting factors of dissolved heavy metals in seawater of Dongshan Bay, Fujian Province[J]. Journal of Marine Sciences, 2016, 34(2): 75-82.
- [16] KAUSHIK A, KANSAL A, SANTOSH S, et al. Heavy metal contamination of river Yamuna, Haryana, India: Assessment by Metal Enrichment Factor of the Sediments[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 164(1): 265-270.
- [17] 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[J]. 上海海洋大学学报, 2017, 26(1): 85-93.
- LUO K, LI L, LONG G Y, et al. Heavy metal pollution and their ecological risk assessment in sediments from southern Hainan Island [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2017, 26(1): 85-93.
- [18] STAHL H, WARNKEN K W, SOCHACZEWSKI L, et al. A combined sensor for simultaneous high resolution 2-D imaging of oxygen and trace metals fluxes [J]. Limnology and Oceanography Methods, 2012, 10(5): 389-401.
- [19] 安立会, 郑丙辉, 张雷, 等. 渤海湾河口沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 中国环境科学, 2010, 30(5): 666-670.
- AN L H, ZHENG B H, ZHANG L, et al. Occurrence of heavy metals in surface sediments from estuaries in Bohai bay and their ecological risk assessment[J]. China Environmental Science, 2010, 30(5): 666-670.
- [20] 杨辉, 陈国光, 刘红樱, 等. 长江下游主要湖泊沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 地球与环境, 2013, 41(2): 160-165.
- YANG H, CHEN G G, LIU H Y, et al. Pollution of heavy metals in the sediments from the lower reaches of the Yangtze River and its potential ecological risk assessment [J]. Earth and Environment, 2013, 41(2): 160-165.
- [21] 陈素兰, 胡冠九, 厉以强, 等. 长江江苏段生物体内重金属污染调查与评价[J]. 江苏地质, 2007, 31(3): 223-227.
- CHEN S L, HU G J, LI Y Q, et al. Heavy metal content pollution investigation and evaluation of organisms in Jiangsu Section of Changjiang River[J]. Jiangsu Geology, 2007, 31(3): 223-227.
- [22] 张慧婷, 庄平, 章龙珍, 等. 长江口中华鲟幼鱼主要饵料生物体内重金属 Cu、Cd 和 Hg 的积累与评价[J]. 海洋渔业, 2011, 33(2): 159-164.
- ZHANG H T, ZHUANG P, ZHANG L Z, et al. Accumulation and evaluation of heavy metals Cu, Cd and Hg in prey species of juvenile Chinese sturgeons (*Acipenser Sinensis*) in the Yangtze River Estuary, China [J]. Marine Fisheries, 2011, 33(2): 159-164.
- [23] 孙维萍, 潘建明, 吕海燕, 等. 2006 年夏冬季长江口、杭州湾及邻近海域表层海水溶解态重金属的平面分布特征[J]. 海洋学研究, 2009, 27(1): 37-43.
- SUN W P, PAN J M, LV H Y, et al. Distribution of dissolved trace metals in summer and winter of 2006 in Changjiang River Estuary and Hangzhouwan Bay [J]. Journal of Marine Sciences, 2009, 27(1): 37-43.
- [24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 17378.4—2007 海洋监测规范第 4 部分: 海水分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration of China. GB 17378.4—2007 The specification for marine monitoring—Part 4: Seawater analysis[S]. Beijing: China Standard Press, 2008.
- [25] 蔡文贵, 林钦, 贾晓平, 等. 考洲洋重金属污染水平与潜在生态危害综合评价[J]. 生态学杂志, 2005, 24(3): 343-347.
- CAI W G, LIN Q, JIA X P, et al. Synthetic assessment on pollution level and potential ecological risk of heavy metals in Kaozhou Bay [J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(3): 343-347.
- [26] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [27] 方明, 吴友军, 刘红, 等. 长江口沉积物重金属的分布、来源及潜在生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2013, 33(2): 563-569.
- FANG M, WU Y J, LIU H, et al. Distribution, sources and

- ecological risk assessment of heavy metals in sediments of the Yangtze River estuary [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(2): 563-569.
- [28] 滕德强, 吕颂辉, 郭福星, 等. 长江口及其邻近海域表层沉积物中重金属分布和潜在生态危害评价[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(2): 11-19.
TENG D Q, LYU S H, GUO F X, et al. Distribution pattern of heavy metals in surface sediments of the Yangtze estuary and adjacent areas and its ecological risk [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(2): 11-19.
- [29] 陈彬, 范德江, 郭志刚, 等. 长江口及邻近海域细颗粒沉积物中重金属的空间分布及沉积通量[J]. *海洋学报*, 2014, 36(11): 101-110.
CHEN B, FAN D J, GUO Z G, et al. Heavy metals distribution patterns and sedimentary fluxes in fine-grained sediments in the Changjiang Estuary and its adjacent areas [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(11): 101-110.
- [30] 孟翊, 刘苍宇, 程江. 长江口沉积物重金属元素地球化学特征及其底质环境评价[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(3): 37-43.
MENG Y, LIU C Z, CHENG J. Geochemical characteristics of heavy metal elements in the surface sediments in the Yangtze river estuarine area and evaluations of the bed materials [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(3): 37-43.
- [31] 张芬, 孙振中, 张玉平. 长江口重要渔业水域重金属分布特征及风险评价[J]. *水产科技情报*, 2017, 44(4): 177-180.
ZHANG F, SUN Z Z, ZHANG Y P. Distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in important fishery waters of the Yangtze River Estuary [J]. *Fisheries Science & Technology Information*, 2017, 44(4): 177-180.
- [32] 胡琴, 李强, 黄必桂, 等. 黄河口附近海域表层沉积物重金属污染状况及年际变化分析[J]. *渔业科学进展*, 2017, 38(2): 16-23.
HU Q, LI Q, HUANG B G, et al. Pollution status and the annual variations of heavy metals in the surface sediments in the adjacent sea water of the Yellow River Estuary [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2017, 38(2): 16-23.
- [33] 倪志鑫, 张霞, 蔡伟叙, 等. 珠江口沉积物中重金属分布、形态特征及风险分析[J]. *海洋环境科学*, 2016, 35(3): 321-328.
NI Z X, ZHANG X, CAI W X, et al. Distribution, speciation and risk assessment of trace metals in surface sediment of the Zhujiang Estuary [J]. *Marine Environmental Science*, 2016, 35(3): 321-328.
- [34] 唐庆丽, 程金平, 高昊旻, 等. 上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价[J]. *环境科学*, 2013, 34(4): 1340-1344.
TANG Q L, CHENG J P, GAO H M, et al. Ecological risk evaluation of heavy metals of the typical dredged mud in Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(4): 1340-1344.
- [35] 施沁璇, 盛鹏程, 房伟平, 等. 钱塘江杭州段表层沉积物中重金属的生态风险及其生物累积[J]. *上海海洋大学学报*, 2018, 27(5): 710-717.
SHI Q X, SHENG P C, FANG W P, et al. Ecological risk and bioaccumulation of heavy metals in the surface sediments in Qiantang River [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2018, 27(5): 710-717.
- [36] KOSCHINSKY A, FRITSCH U, WINKLER A. Sequential leaching of Peru Basin surface sediment for the assessment of aged and fresh heavy metal associations and mobility [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2001, 48(17/18): 3683-3699.
- [37] 唐峰华, 伍玉梅, 樊伟, 等. 长江口浮游植物分布情况及与径流关系的初步探讨[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(12): 2934-2940.
TANG F H, WU Y M, FAN W, et al. Preliminary discussion on phytoplankton distribution and its relation to the runoff in the Yangtze River estuary [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(12): 2934-2940.
- [38] 董爱国, 翟世奎, 于增慧, 等. 长江口海域表层沉积物重金属元素的潜在生态风险评价[J]. *海洋科学*, 2010, 34(3): 69-75.
DONG A G, ZHAI S K, YU Z H, et al. Evaluation on potential ecological risk of the heavy metals in the surface sediments of the Changjiang (Yangtze) Estuary and its adjacent coastal area [J]. *Marine Sciences*, 2010, 34(3): 69-75.
- [39] 尹肃, 冯成洪, 李扬颺, 等. 长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征[J]. *环境科学*, 2016, 37(3): 917-924.
YAN S, FENG C H, LI Y Y, et al. Speciation and risk characteristics of heavy metals in the sediments of the Yangtze Estuary [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(3): 917-924.
- [40] 王书航, 王雯雯, 姜霞, 等. 蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(9): 3562-3571.
WANG S H, WANG W W, JIANG X, et al. Heavy metal speciation and stability in the sediment of Lihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(9): 3562-3571.
- [41] 姚志峰, 章龙珍, 庄平, 等. 铜对中华鲟幼鱼的急性毒性及对肝脏抗氧化酶活性的影响[J]. *中国水产科学*, 2010, 17(4): 731-738.
YAO Z F, ZHANG L Z, ZHUANG P, et al. Effects of antioxidant enzyme in liver and acute toxicity of Cu^{2+} on juvenile Chinese sturgeon [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2010, 17(4): 731-738.
- [42] 章龙珍, 姚志峰, 庄平, 等. 铜暴露对中华鲟幼鱼的生长、消化酶活性和组织中铜积累的影响[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2012, 51(6): 789-795.
ZHANG L Z, YAO Z F, ZHUANG P, et al. Accumulation of Cu^{2+} in different tissues and the effect on digestive enzymes activities in juvenile Chinese Sturgeon, *Acipenser sinensis* [J].

- Journal of Fudan University (Natural Science), 2012, 51 (6): 789-795.
- [43] 冯琳, 章龙珍, 庄平, 等. 铅在中华鲟幼鱼不同组织中的积累与排放[J]. 应用生态学报, 2010, 21(2): 476-482.
- FENG L, ZHANG L Z, ZHUANG P, et al. Lead accumulation and elimination in juvenile *Acipenser sinensis* tissues[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21 (2): 476-482.
- [44] 庄平, 赵优, 章龙珍, 等. 三种重金属对长江口纹缟虾虎鱼早期发育的毒性作用[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(8): 719-726.
- ZHUANG P, ZHAO Y, ZHANG L Z, et al. Toxicology of three heavy metal ions to early life development of trident tiger trigonocephalus collected from the Yangtze estuary [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18 (8): 719-726.

Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the adjacent sea area of *Acipenser sinensis* reserve in the Yangtze River Estuary

ZHANG Jiankun¹, YANG Hong¹, WANG Chunfeng¹, CHEN Jinhui^{2,3}, WU Jianhui^{2,3}

(1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Aquatic Wildlife Conservation and Research Center, Shanghai 200092, China; 3. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to explore the ecological environment of the sea area near the *Acipenser sinensis* reserve in the Yangtze River Estuary, the seasonal variation and spatial distribution characteristics of heavy metal elements in surface seawater and sediments were analyzed. The comprehensive pollution index method and potential ecological risk index method were used to evaluate the heavy metal pollution degree and ecological risk grade. The results showed that the average concentrations of heavy metals Hg, As, Cu, Pb, Cd, Cr and Zn in seawater in 2018 was 3.852 μg/L, 1.948 μg/L, 6.362 μg/L, 4.542 μg/L, 0.294 μg/L, 6.201 μg/L, 44.56 μg/L, and Hg, Cu, Pb and Zn all exceeded national first-class seawater quality standards; the average concentration of heavy metals Hg, As, Cu, Pb, Cd, Cr and Zn in the sediment is 0.339 mg/kg, 14.815 mg/kg, 5.055 mg/kg, 3.436 mg/kg, 0.133 mg/kg, 12.667 mg/kg, 75.578 mg/kg, only Hg exceeded the quality standards of the first category of marine sediments. The concentrations of heavy metals in the surface seawater are higher in spring and summer, and higher in the sediments in autumn and winter, which is mainly related to the seasonal variation of runoff into the sea. The spatial distribution showed that the concentration of heavy metals in the core area of the *Acipenser sinensis* reserve was higher, and the Hg, As and Zn elements had an obvious enrichment trend. The comprehensive pollution index of heavy metals in seawater is greater than 5, which is at a serious pollution level, while the comprehensive pollution index of sediments is less than 5, which is at a low pollution level. The potential ecological risk coefficients of seven heavy metals are Hg > Cd > As > Cu > Zn > Pb > Cr. Except that Hg is at a very strong level of ecological risk, the other elements are at a low level of ecological risk. The comprehensive potential ecological risk index of heavy metals is at a strong level of risk.

Key words: *Acipenser sinensis* reserve; seawater and sediment; heavy metals; pollution assessment; ecological risk