

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.20107

## 上海地区池塘沉积物中氮、磷、有机碳及重金属风险评价

张玉平, 刘金金, 张芬

上海市水产研究所, 上海市渔业环境监测站, 上海 200433

**摘要:** 为综合评估上海地区池塘沉积物环境质量状况, 2016—2019年对上海地区36个养殖场池塘采集沉积物样品360个, 检测和分析沉积物中总氮(TN)、总磷(TP)、总有机碳(TOC)及重金属Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Hg和As含量。研究表明, 池塘0~10 cm层和10~20 cm层沉积物中TN、TP、TOC及各重金属均值分布无显著差异( $P>0.05$ ), 0~20 cm层沉积物(干重)中TN、TP和TOC平均含量分别为 $(873.37\pm 352.45)$  mg/kg、 $(685.66\pm 199.66)$  mg/kg和 $(6.62\pm 3.05)$  mg/g, 三者相关性显著。综合污染指数法和有机指数法评价结果表明, 池塘沉积物中氮和有机物质的累积量较低, 磷累积量相对较高, 均低于其他地区高产池塘。池塘沉积物中Cr、Cd、Cu和Hg样品超标率分别为6.42%、3.21%、4.13%和1.38%, Zn、Pb和As无超标现象。地质累积指数、潜在生态危害指数法和一致性沉积物质量基准评价结果表明, 上海地区池塘沉积物中重金属整体上处于清洁等级、低潜在生态危害状态, 预测不会引发生物毒性效应。

**关键词:** 池塘沉积物; 氮磷有机碳; 重金属; 风险评价

**中图分类号:** S955; S96

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1005-8737-(2020)12-1448-16

水生生态系统中沉积物是其重要组成部分, 承载着重要的环境演变信息<sup>[1]</sup>, 其环境质量关系整个水生态系统的健康与可持续发展。在水产养殖池塘中, 沉积物表层的化学和生物学过程直接影响水质和养殖产量, 池塘沉积物作为各种化学物质的存储库、植物和动物的栖息地以及营养素再循环中心对生态系统是有益的<sup>[2]</sup>, 但它同时会消耗大量氧, 变成厌氧状态或成为有毒溶解物质的来源<sup>[3-4]</sup>, 因此池塘沉积物环境质量状况对生态系统稳定性、养殖生产效益以及食品安全均有重要意义。

国内沉积物中营养盐及重金属风险评价研究多见于河流<sup>[5]</sup>、湖库<sup>[6-7]</sup>及近海<sup>[8-9]</sup>, 池塘沉积物中氮、磷、碳的研究常见于氮、磷收支类研究<sup>[10-11]</sup>, 而对池塘沉积物氮、磷、碳及重金属风险评价尚未见报道。本文通过对上海地区养殖池塘沉积物中氮、磷、有机碳以及部分重金属的常年连续监测, 联合使用多种评价方法分析和评价该地区池

塘沉积物环境质量状态, 为相关方面管理工作提供客观、科学的管理依据, 以服务于上海市“都市绿色健康”农业。

### 1 材料与方法

#### 1.1 样品采集

2016—2019年对上海地区36个养殖场池塘沉积物进行跟踪监测, 养殖场覆盖崇明区、奉贤区、青浦区、松江区、金山区和浦东新区, 共采样沉积物样品360个, 池塘养殖种类主要包括淡水鱼, 包括草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)、青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)、翘嘴红鲌(*Culter alburnus*)、黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)等, 以及凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)和中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)。池塘样点编号规则为“养殖种类首字母+池塘顺次编号”, 如F1为1号淡水鱼养殖池塘, 各样点一年内采样频次0~4次不等, 各样点分布见图1。

**收稿日期:** 2020-04-20; **修订日期:** 2020-04-27.

**基金项目:** 上海市科技兴农重点攻关项目(沪农科攻字[2015]第6-3-3号); 上海市科技兴农推广项目(沪农科推字[2017]第1-12号).

**作者简介:** 张玉平(1979-), 男, 高级工程师, 主要从事渔业环境评价及生态修复研究工作. E-mail: zhangyp@msn.com

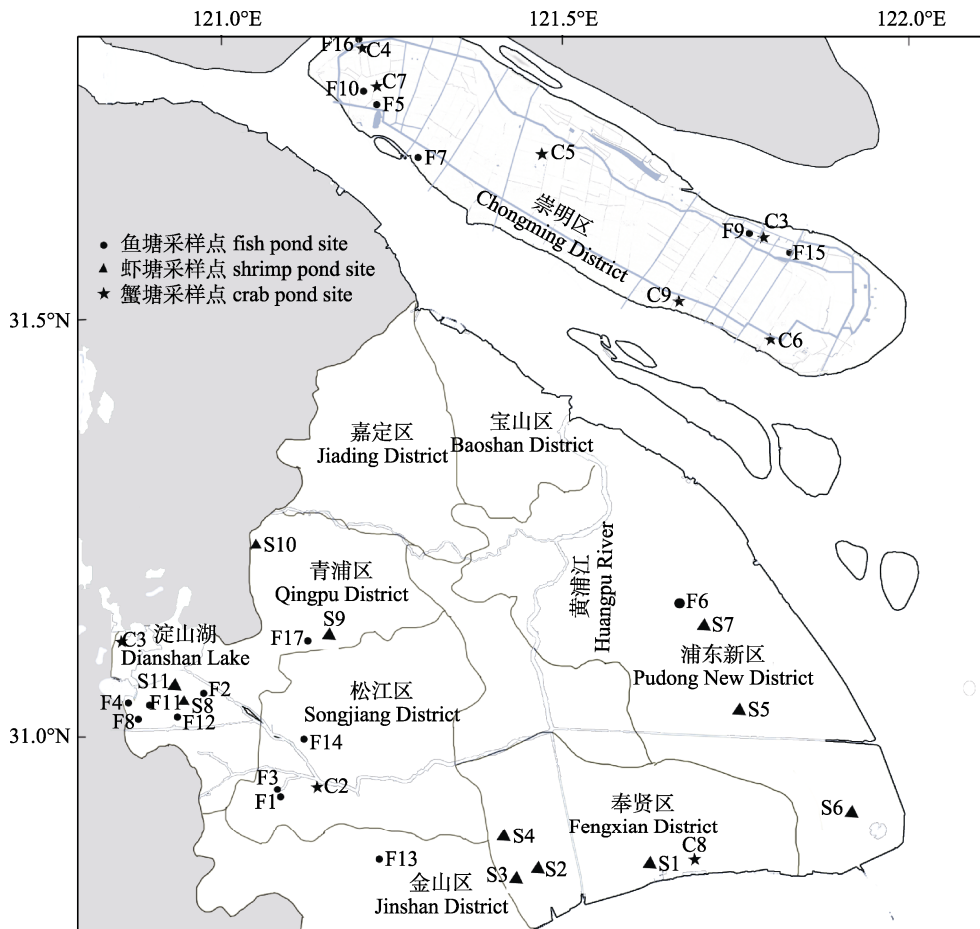


图 1 上海地区养殖池塘样点分布图

Fig. 1 Distribution of pond samples of Shanghai

利用柱状采泥器(北京普雷德仪器设备有限公司)在池塘对角线平均取三点采集三管 0~20 cm 的沉积物样品, 现场分 0~10 cm 和 10~20 cm 两层, 同层样品混匀。样品带回实验室后去除石块、螺蛳等杂质, 自然风干后研磨过 100 目(孔径 0.150 mm)筛, 存储待测。

### 1.2 测定方法与数据处理

全自动凯氏定氮仪(沛欧 KJELTEC 8400)测定沉积物中总氮(TN)含量(干重, 下同), 碱熔-钼锑抗分光光度法(HJ 632-2011)测定沉积物中总磷(TP)含量, 岛津 SSM-5000 差减法测定沉积物中有机碳(TOC)含量。电感耦合等离子体质谱法<sup>[12]</sup>测定沉积物中 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 和 As 等元素, 微波消解原子荧光法<sup>[13]</sup>测定沉积物中 Hg 含量。

为保证测定结果的准确性, 进行沉积物标准品分析和样品重复性分析(重复率为 5%), 样品分析误差均小于 10%, 符合质量控制要求。利用 Office Excel 2013 软件进行数据汇总, SPSS 19.0 软件进行数据统计分析, 数据显著性差异分析方法为单因素 ANOVA 分析, 以  $P < 0.05$  作为差异显著性水平。KMO 和 Bartlett 球形度检验结果显示 KMO 值为 0.686, 大于 0.5, 相伴概率为 0.00, 可进行因子分析(PCA), Origin Lab 8.0 绘图。

### 1.3 氮磷碳评价方法

综合污染指数法选用 TN 和 TP 为评价参数, 表征沉积物 N、P 综合累积程度, 单因子指数又可分别反映 N 和 P 的富营养化程度, 计算公式为:

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

$$FF = \sqrt{\frac{F^2 + F_{\max}^2}{2}} \quad (2)$$

式中,  $S_i$  为单项污染指数或单因子指数;  $C_i$  为评价因子  $i$  的实测浓度值(mg/kg);  $C_s$  为评价因子  $i$  的评价标准值(mg/kg);  $F$  为  $n$  项污染物污染指数平均值;  $F_{\max}$  为最大单项污染指数, FF 为综合污染指数, 污染程度分级参考王佩等<sup>[14]</sup>。

有机指数法<sup>[15]</sup>评价沉积物中有机质和氮的累积程度, 计算公式为:

$$\text{Org-Index} = \text{Org-C} \times \text{Org-N} = \text{Org-C} \times \text{TN} \times 95\% \quad (3)$$

式中, Org-Index 为有机指数; Org-C 为沉积物中有机碳(TOC)含量(%); Org-N 为沉积物中有机氮含量, 以 95% 的 TN 含量(%)计。当 Org-Index  $\leq 0.05$

时沉积物为清洁状态,  $0.05 < \text{Org-Index} \leq 0.20$  为轻度有机污染,  $0.20 < \text{Org-Index} < 0.50$  为中度有机污染,  $\text{Org-Index} \geq 0.50$  为重度有机污染。

### 1.4 重金属评价方法

**1.4.1 地质累积指数法** 地质累积指数法(geo-accumulation index,  $I_{\text{geo}}$ )主要用于对沉积物外源重金属的累积状况进行评价, 计算公式:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \frac{C_d^i}{K \times C_s^i} \quad (4)$$

式中,  $C_d^i$  为沉积物重金属  $i$  的实测值(mg/kg);  $K$  为造岩运动可能引起的背景值波动而设定的常数, 一般为 1.5;  $C_s^i$  为相应重金属元素的背景值(mg/kg)。污染程度分级见表 1。

表 1 地质累积指数法和潜在生态危害风险指数法等级划分汇总

Tab. 1 Classification summary of  $I_{\text{geo}}$ ,  $E_r$ , and RI

地质累积指数 geo-accumulation index, $I_{\text{geo}}$		单因子潜在生态危害系数 single factor potential ecological risk index, $E_r$		潜在生态危害风险指数 potential ecological risk index, RI	
范围 range	污染等级 level of pollution	范围 range	风险等级 level of risk	范围 range	风险等级 level of risk
$I_{\text{geo}} \leq 0$	清洁 unpolluted				
$0 < I_{\text{geo}} \leq 1$	轻度污染 light pollution	$E_r \leq 40$	低风险 low risk	$RI \leq 150$	低风险 low risk
$1 < I_{\text{geo}} \leq 2$	偏中度污染 light to moderate pollution	$40 < E_r \leq 80$	中度风险 moderate risk	$150 < RI \leq 300$	中度风险 moderate risk
$2 < I_{\text{geo}} \leq 3$	中度污染 moderate pollution	$80 < E_r \leq 160$	高度风险 higher risk	$300 < RI \leq 600$	高度风险 severe risk
$3 < I_{\text{geo}} \leq 4$	偏重度污染 moderate to heavy pollution	$160 < E_r \leq 320$	严重风险 high risk	$RI > 600$	严重风险 serious risk
$4 < I_{\text{geo}} \leq 5$	重度污染 heavy pollution	$E_r > 320$	极严重风险 serious risk		
$I_{\text{geo}} > 5$	极重度污染 serious pollution				

**1.4.2 潜在生态危害指数法** 潜在生态危害指数(potential ecological risk index, RI)法<sup>[16]</sup>考虑不同金属毒性对生物的生态风险, 定量评价沉积物中重金属潜在生态危害程度, 计算公式:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_f^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{C_d^i}{C_s^i} \quad (5)$$

式中,  $C_d^i$  为重金属  $i$  在沉积物中的实测值(mg/kg);  $C_s^i$  为重金属  $i$  的背景参考值(mg/kg);  $C_f^i$  为重金属  $i$  的污染系数;  $T_r^i$  为重金属  $i$  的生态毒性响应系数, Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Hg 和 As 的毒性系数分别取 5、1、5、30、2、40 和 10;  $E_r^i$  为单因子重金属  $i$  的生态危害系数。RI 等级划分结果见表 1。

**1.4.3 一致性沉积物质量基准法** 一致性沉积物质量基准(consensus-based sediment quality guide-

lines, CBSQGs)<sup>[17]</sup>是一种着重于协调不同基准优劣的聚合沉积物基准, 它通过筛选几种具有相似评价目标的单个沉积物质量基准(SQGs), 取其几何平均值来获得相应污染物的效应浓度。CBSQGs 包括阈值效应浓度(threshold effect concentrations, TECs)和可能效应浓度(probable effect concentrations, PECs), 当沉积物中污染物含量低于 TECs 时, 认为不会发生生物毒性效应, 当沉积物中污染物含量高于 PECs 时, 认为会发生生物毒性效应, 当污染物含量介于 TECs 和 PECs 之间时, 认为发生和不发生生物毒性效应的概率相当, 无法预测其生物毒性效应。MacDonald 等<sup>[17]</sup>引用平均可能效应浓度商(mean probable effect concentration quotient,  $M_{\text{PEC-Q}}$ )来评价多种重金属致污物的综合生物毒性效应, 其计算公式为:

$$M_{\text{PEC-Q}} = \left( \sum_{i=1}^n C_d^i / \text{PEC}_i \right) / n \quad (6)$$

式中,  $C_d^i$  为第  $i$  种重金属的实测值(mg/kg);  $\text{PEC}_i$  为第  $i$  种重金属的可能效应浓度(mg/kg);  $n$  为重金属种类个数。当  $M_{\text{PEC-Q}} < 0.5$  时, 沉积物中重金属不会引发生物毒性反应; 当  $M_{\text{PEC-Q}} > 0.5$  时, 发生生物毒性概率随  $M_{\text{PEC-Q}}$  值呈指数上升趋势。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮、磷和有机碳的分布

上海地区池塘表层 0~10 cm 层沉积物中 TN、TP 和 TOC 平均含量同 10~20 cm 层无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 各样点池塘表层 20 cm 内沉积物中 TN、TP 和 TOC 平均分布见图 2, TN 含量范围 287.24~2683.24 mg/kg, 平均为 (873.37±352.45) mg/kg, TP 含量范围 216.84~1755.69 mg/kg, 平均为 (685.66±199.66) mg/kg, TOC 含量范围 1.41~19.78 mg/g, 为 (6.62±3.05) mg/g。鱼塘、虾塘和蟹塘沉积物中 TN、TP 和 TOC 的平均分布均无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 鱼塘沉积物中 TN、TP 和 TOC 的变异系数(CV)均高于虾塘和蟹塘, 淡水鱼养殖池塘各样点内氮、磷、碳年均含量变化趋势见图 3, 鱼、虾和蟹塘沉积物中 TN 和 TOC 年际间年均含量无明显差异 ( $P > 0.05$ ), 2018 年、2019 年鱼、虾、蟹塘沉积物中 TP 年均含量较 2016 和 2017 年高, 沉积物中 TN 和 TP 含量无逐年累积态势, 2019 年监测到养殖末期池塘沉积物中 TOC 含量较养殖初期增加了 11.24%, 绝对增量 0.689%。有研究表明, 对虾养殖周期内 TOC 含量随着养殖时间的延长呈上升趋势, 增加比例 10% 左右<sup>[18-20]</sup>。与其他地区池塘及本地水域沉积物相比, 上海地区池塘沉积物中 TN、TP 和 TOC 的平均分布均低于北京<sup>[21]</sup>和广州地区<sup>[22]</sup>的高产鱼塘, 同山东<sup>[23]</sup>与河北<sup>[24]</sup>对虾池塘及上海本地的罗氏沼虾池塘<sup>[25]</sup>相当, 低于上海郊区河道<sup>[25]</sup>、黄浦江<sup>[26]</sup>和淀山湖<sup>[27]</sup>, 高产池塘投饵量相对更高, 城市河道及湖泊受密集人口及工业的影响水域沉积物富营养化更严重。整体上, 上海地区养殖池塘沉积物中氮、磷和碳等营养盐元素累积量相对较低。

### 2.2 C/N 比和 N/P 比值

上海地区池塘沉积物中 C/N 比值(TOC 与 TN 的质量比)范围 2.99~20.59, 平均为 7.82±2.33, 鱼、虾和蟹塘之间 C/N 比均值无显著差异 ( $P > 0.05$ )。根据 C/N 比可分析沉积物中有机物的来源, 陆地土壤或受外源输入影响较重的水域沉积物 C/N 比较高 ( $> 12$ )<sup>[28]</sup>, 碳源多来自藻类和浮游生物的水域沉积物 C/N 比一般小于 7, 如外源污染较重的巢湖东区沉积物中 C/N 比为 16~20<sup>[29]</sup>, 太湖受陆源输入影响较重的东太湖区域 C/N 比明显高于其他区域<sup>[15]</sup>。87.93% 的本地池塘沉积物样品中 C/N 比低于 10, 表明池塘沉积物中 C 主要来源于池塘内部的生物沉降。个别样品 C/N 比值很高 ( $C/N_{\text{max}} = 20.59$ ), 所在采样点下一季度样品 C/N 值随后降至 7 左右, 表明 C/N 高值时间段内存在优质 C 源的加入<sup>[30]</sup>。池塘沉积物中 N/P 比范围 0.28~3.06, 为 1.23±0.40, 鱼、虾和蟹塘之间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。沉积物中的 N、P 组成随环境条件的改变而变化, 因外源污染物持续输入武汉东湖<sup>[31]</sup>沉积物中 N/P 比值在 1982—1984 年时达到 13.47~16.47, 经过 20 年治理和发展后, N/P 降至 3 左右。

表 2 上海地区养殖池塘沉积物中 C/N 比和 N/P 比结果描述性汇总

Tab. 2 Descriptive summary of ratios between carbon and nitrogen, and nitrogen and phosphorus in pond sediments of Shanghai

项目 item	种类 species	样品量 number of sample	均值 average	标准差 SD	极小值 min	极大值 max
C/N	鱼 fish	58	7.56	2.52	2.99	17.35
	虾 shrimp	51	7.80	2.27	3.05	14.92
	蟹 crab	65	8.06	2.22	4.25	20.59
	总计 total	174	7.82	2.33	2.99	20.59
N/P	鱼 fish	58	1.22	0.447	0.28	3.02
	虾 shrimp	51	1.31	0.413	0.77	3.06
	蟹 crab	65	1.18	0.327	0.55	2.15
	总计 total	174	1.23	0.397	0.28	3.06

### 2.3 重金属分布

池塘沉积物 0~10 cm 层和 10~20 cm 层内各重金属平均分布均无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 20 cm 层内沉积物中 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Hg 和 As 的平均含量见表 3, Cd 和 Hg 的 CV 值较高, 分别为

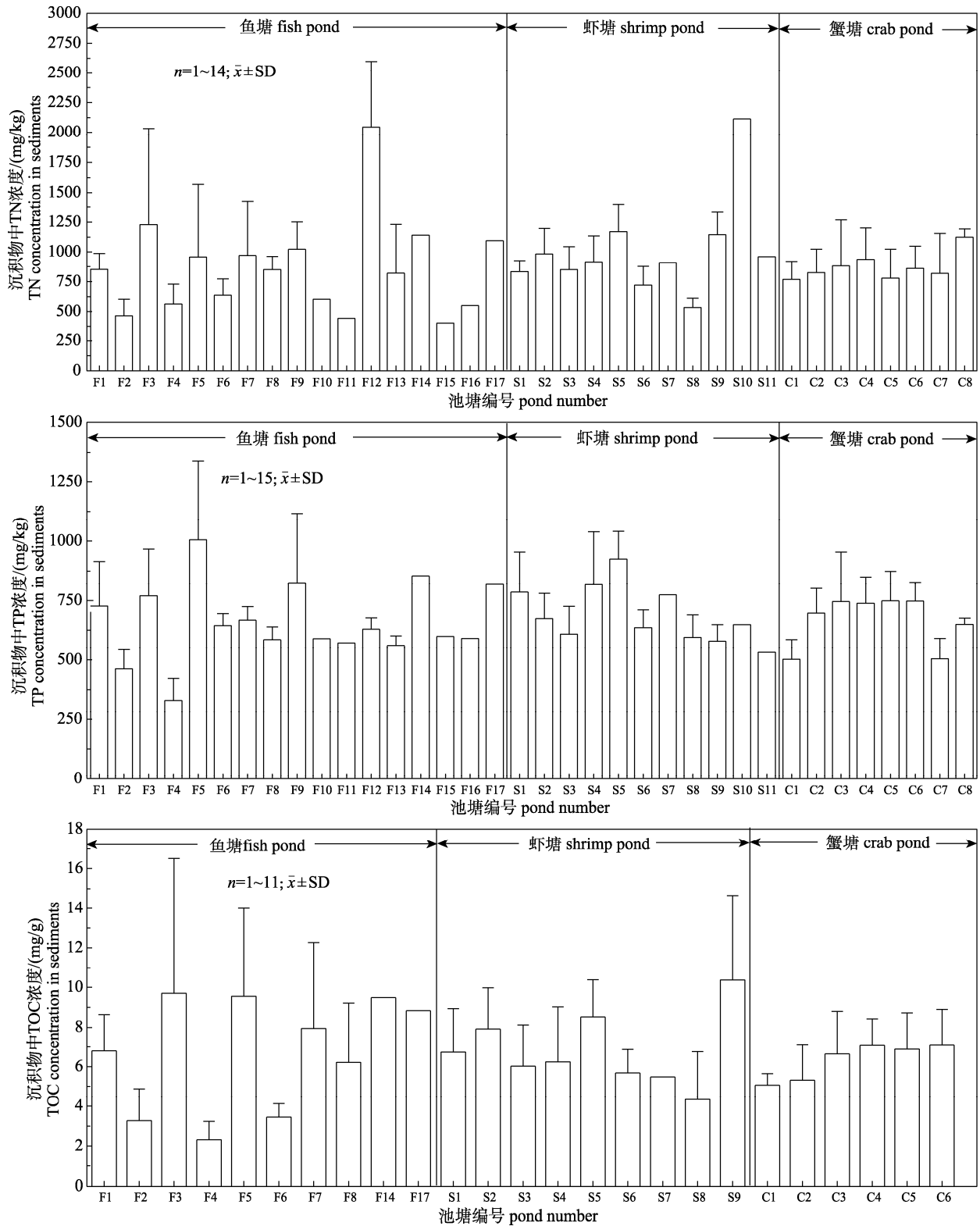


图 2 上海地区不同养殖池塘采样点中 TN、TP 和 TOC 平均分布柱状图

Fig. 2 Average columns of TN, TP and TOC in different pond sites of Shanghai

81.27%和 60.38%。Cu、Pb、Cd、Cr 和 As 在不同养殖种类池塘的平均分布无显著差异( $P>0.05$ ),

虾塘沉积物中 Zn 平均含量显著高于鱼塘和蟹塘 ( $P<0.05$ ), 虾、蟹塘沉积物中 Hg 平均含量显著高

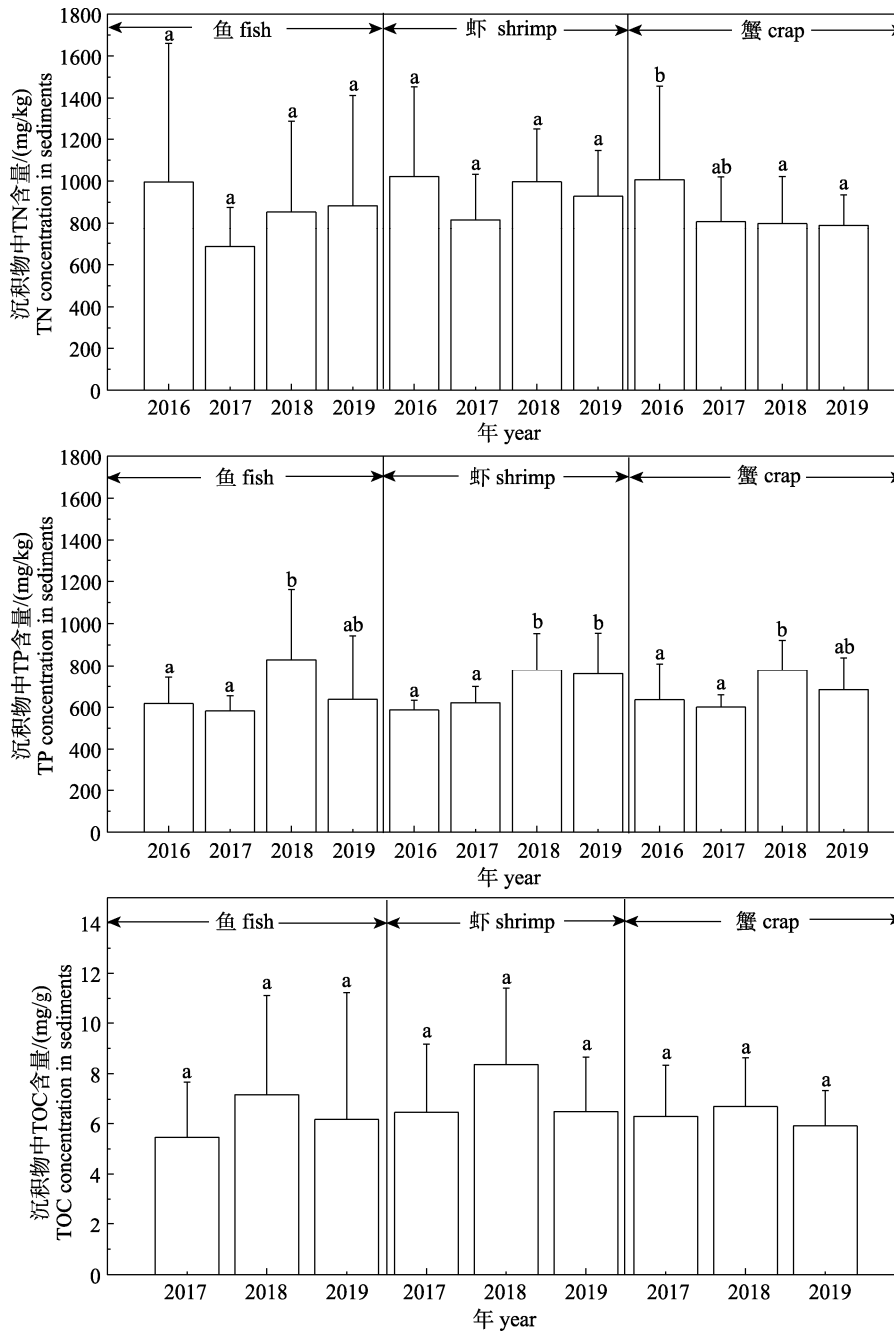


图 3 上海地区不同养殖种类池塘沉积物中 TN、TP 和 TOC 年均值变化趋势  
同一养殖种类组内标有相同字母的年均值之间无显著差异( $P>0.05$ ).

Fig. 3 Variance tendency of the annual averages of TN, TP, and TOC in different species farming pond sediments of Shanghai  
No significant difference between the annual averages marked with the same letter in the same species group ( $P>0.05$ ).

于鱼塘( $P<0.05$ )。不同养殖种类沉积物中个别重金属含量的显著差异可能与饲料组分不同有关,涂杰峰等<sup>[32]</sup>对水产饲料中重金属的研究结果显示对虾饲料中 Cd、Hg 含量明显高于淡水鱼饲料。池塘沉积物中重金属的空间分布差异大,尤其是淡水鱼类养殖池塘,池塘沉积物中重金属年际分

布见图 4,无明显累积现象,不同重金属个别年份平均分布量相对较高。

参考无公害食品淡水养殖产地环境沉积物质量要求标准<sup>[33]</sup>(标准中未涉及的 Cu 和 Zn 以《海洋沉积物质量》<sup>[34]</sup>一级标准中相关限值为参考,重金属样品超标率由高至低分别为: Cr 6.42%、Cd

表 3 上海地区养殖池塘沉积物中重金属平均含量汇总

Tab. 3 Summary of heavy metal averages in sediment of aquaculture ponds in Shanghai

养殖种类 species	n	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Hg	As
鱼 fish	74	21.92±8.21 <sup>a</sup>	64.05±25.89 <sup>a</sup>	14.17±5.9 <sup>a</sup>	0.15±0.12 <sup>a</sup>	50.13±19.63 <sup>a</sup>	0.052±0.036 <sup>a</sup>	7.29±2.68 <sup>a</sup>
虾 shrimp	64	22.73±4.61 <sup>a</sup>	73.19±20.48 <sup>b</sup>	16.03±6.02 <sup>a</sup>	0.17±0.09 <sup>a</sup>	52.18±18.84 <sup>a</sup>	0.068±0.033 <sup>b</sup>	8.21±2.48 <sup>a</sup>
蟹 crab	80	21.91±6.42 <sup>a</sup>	64.66±17.94 <sup>a</sup>	14.64±5.51 <sup>a</sup>	0.19±0.18 <sup>a</sup>	48.51±19.84 <sup>a</sup>	0.068±0.042 <sup>b</sup>	7.64±2.37 <sup>a</sup>
总计 total	218	22.15±6.63	66.96±21.93	14.89±5.82	0.17±0.14	50.13±19.45	0.063±0.038	7.69±2.53

注: 同一列中标有相同上标的均值间无显著差异( $P>0.05$ ).

Note: No significant difference between the average values marked with the same superscript in the same column ( $P>0.05$ ).

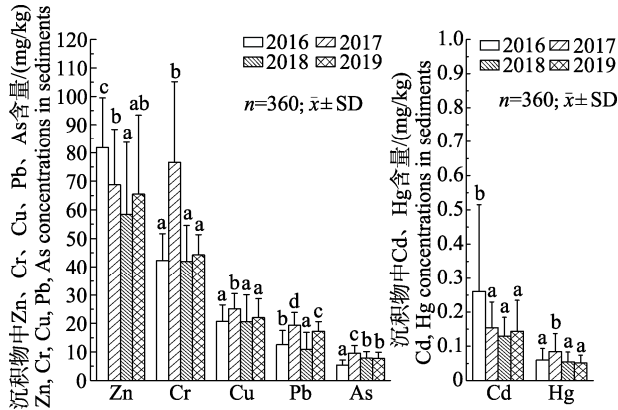


图 4 上海地区养殖池塘沉积物中重金属的年均分布柱状图  
同一重金属指标组内标有不同字母的  
年际均值间存在显著差异( $P<0.05$ ).

Fig. 4 Column of annual value of heavy metals in pond sediments of Shanghai

Different letters indicate significant difference between annual mean values in the same group ( $P<0.05$ ).

4.13%、Cu 3.21% 和 Hg 1.38%, Zn、Pb 和 As 无超标现象。与周边水域及典型养殖池塘相比(图 5),

太湖流域河流沉积物<sup>[35]</sup>中重金属平均含量均高于各地养殖池塘及上海长江口西北部<sup>[36]</sup>, 太湖流域河流水环境受周边发达的经济社会影响, 沉积物中重金属含量较高, 湖州市养殖池塘沉积物中 Zn、Cr、Cu、Pb、Cd 和 Hg 平均含量明显高于上海地区, 湖州是我国重要的传统三大淡水养殖区之一<sup>[37]</sup>, 其淡水养殖产量高、投饵量大, 沉积物中重金属累积量相对较高。上海市长江口西北部沉积物中重金属含量略低于本地养殖池塘, 该区域划有多个水源地水库、渔业自然保护区等特殊功能用区, 环境管理相对较严格, 其沉积物环境质量相对较好。

### 2.4 来源分析

池塘沉积物中与 N、P、TOC 及重金属之间的相关性分析和因子分析(PCA)可揭示元素间潜在关系, 探究其来源问题, 指标相关性分析(表 4)表明: TN、TP 和 TOC 之间均显著正相关( $P<0.05$ ), Cu 与 TN、TP、TOC、Zn、Pb、Cd、

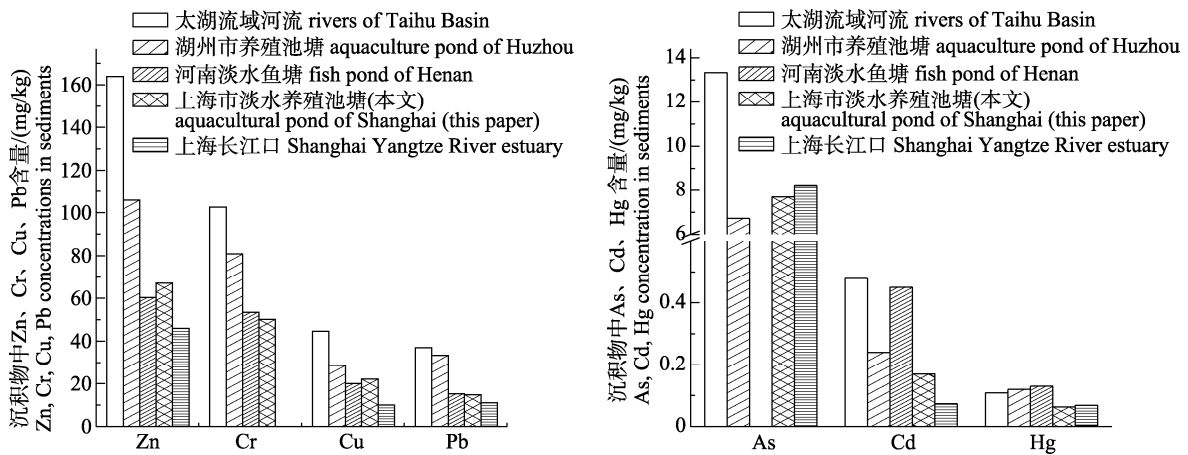


图 5 上海周边水域沉积物中重金属含量分布

Fig. 5 Distribution of heavy metals in sediment of the waters around Shanghai

表 4 上海地区养殖池塘沉积物中 N、P、TOC 以及重金属等各指标间相关系数

**Tab. 4 Correlation coefficients between nitrogen, phosphorus, total organic carbon and heavy metals in pond sediments of Shanghai**

指标 indicator	TN	TP	TOC	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Hg	As
TN	1									
TP	0.462**	1								
TOC	0.784**	0.53**	1							
Cu	0.488**	0.262**	0.373**	1						
Zn	0.236**	0.036	0.04	0.246**	1					
Pb	-0.063	-0.307**	-0.181**	0.336**	0.254**	1				
Cd	0.115*	0.015	0.23**	0.132**	0.074	0.154**	1			
Cr	-0.063	-0.238**	-0.091	0.297**	0.177**	0.521**	-0.002	1		
Hg	0.136**	-0.008	0.086	0.05	0.111*	0.296**	0.115*	0.249**	1	
As	-0.184**	-0.263**	-0.26**	0.305**	0.056	0.551**	-0.121**	0.442**	0.061	1
统计个数 number	355	355	316	355	355	355	355	355	355	355

注: \*\*在 0.01 水平(双侧)上显著相关; \*在 0.05 水平(双侧)上显著相关(双尾检测).

Note: \*\* means that correlation is significant at  $P < 0.01$  level; \* means that correlation is significant at  $P < 0.05$  level (two-tailed).

Cr 和 As 之间显著正相关( $P < 0.05$ ); Zn 与 TN、Pb、Cr 和 Hg 之间显著正相关( $P < 0.05$ ); Pb 与 Cd、Cr、Hg 和 As 之间显著正相关, 与 TP 和 TOC 之间显著负相关( $P < 0.05$ ); Cd 与 TN、TOC 和 Hg 显著正相关( $P < 0.05$ ), 与 As 显著负相关; Hg 与 TN 显著正相关( $P < 0.05$ ); As 与 TN、TP 和 TOC 显著负相关。重金属指标之间相关性显著表明重金属来源有其共性, 沉积物中营养盐指标同 Cu 显著正相关, 与 Pb 和 As 显著负相关。PCA 分析结果得到 3 个主成分(图 6), 累积方差贡献率为 64.45%。成

分 1 的主要构成为 TN、TP 和 TOC, 方差贡献率为 27.96%, 该类营养盐因子来源相同, 主要为池塘进水、饲料及浮游植物类沉降; 成分 2 主要构成涵盖了大多数重金属, 如 Cu、Zn、Pb、Cr 和 As, 方差贡献率为 25.45%, 成分 3 由 Cd 和 Hg 主要构成, 方差贡献率为 11.04%。

根据以上统计分析结果, 可将重金属分为三大类: 第一类为 Cu 和 Zn, 沉积物中 Cu 和 Zn 通常与工业生产和排污有关<sup>[38-39]</sup>, 且渔用饲料和鱼药中 Cu 和 Zn 的添加现象较为普遍<sup>[40]</sup>, 同时 Cu 和 Zn 与营养盐指标密切相关性证明其来源与进水及饲料有关; 第二类为 Pb、Cr 和 As, 此类重金属的富集可反映人类活动的影响, 电池及化工涂料等工业排污中含有大量 Cr、As、Pb 和 Cd 等<sup>[41]</sup>, 上海地区处长江三角洲, 其潮滩性质的土壤受工业和生活排污的影响 Cr、Pb 等累积量较大<sup>[42]</sup>; 第三类为 Cd 和 Hg, Cd 和 Hg 的来源与工业生产有关外, 还与渔用饲料密切相关, 鱼粉作为渔用饲料的优质蛋白源, 其 Cd 含量超标比例较为严重<sup>[43]</sup>, 目前因为鱼粉对水产动物提供的优质营养成分及优秀诱食效果使其在水产饲料中无法被完全取代。

**2.5 N、P、TOC 风险评价**

分别以 3 种(表 5)广泛使用的 N、P 背景值为标准对池塘沉积物进行综合污染评价, 结果显示(表 6): 在加拿大安大略省制定的沉积物 N、P 标准<sup>[44]</sup>下, 70.90% 的沉积物样品中 TN 属轻度到中度污

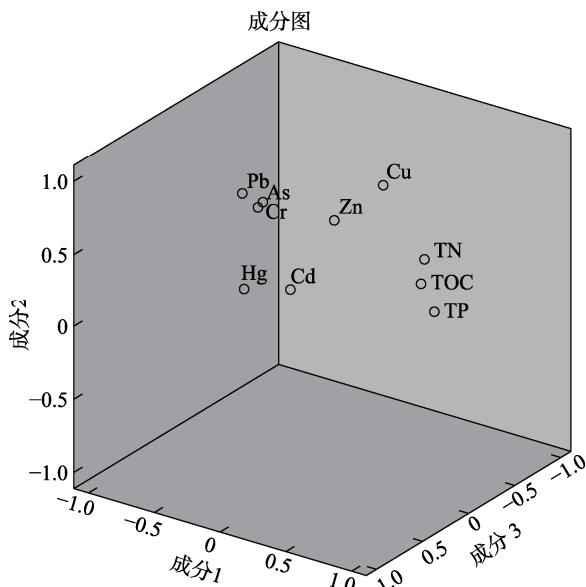


图 6 上海地区养殖池塘沉积物中 N、P、TOC 及重金属因子载荷图

Fig. 6 Component plot of TN, TP, TOC and heavy metals in aquaculture pond sediments of Shanghai in rotated space



表 5 沉积物中 TN 和 TP 常用背景值  
Tab. 5 Background values of TN and TP in sediment

来源 source	标准值 standard	mg/kg	
		总氮 TN	总磷 TP
加拿大安大略省环境和能源部 Ministry of Environment and Energy, Ontario, Canada	最低级别生态风险效应值 lowest level of ecological risk effect values	550	600
美国环境保护局 Environmental Protection Agency of USA	轻度污染标准限值 light pollution standard limits	1000	420
中国东部浅水湖泊 sallow lakes in eastern China	沉积物基准阈值 sediment relevent backgrounds	1111	457

表 6 上海地区养殖池塘沉积物氮磷污染指数均值及分级占比  
Tab. 6 Pollution index averages and grading proportion of TN and TP in pond sediments of Shanghai

污染情况 pollution situation	总氮污染指数 $S_{TN}$			总磷污染指数 $S_{TP}$			综合污染指数 FF		
	$C_{STN1}$ (550)	$C_{STN2}$ (1000)	$C_{STN3}$ (1111)	$C_{STP1}$ (600)	$C_{STP2}$ (420)	$C_{STP3}$ (457)	$C_{S1}$	$C_{S2}$	$C_{S3}$
清洁 clean	11.27	72.3	82.63	0.47	0	0.47	9.86	7.98	12.68
轻度污染 light pollution	40.85	22.07	13.15	35.21	3.76	7.51	49.3	54.46	61.03
中度污染 moderate pollution	30.05	4.23	3.29	53.05	44.13	52.58	30.99	29.58	20.19
重度污染 heavy pollution	17.84	1.41	0.94	11.27	52.11	39.44	9.86	7.98	6.1
污染指数均值 index average	1.59	0.87	0.79	1.14	1.63	1.50	1.50	1.47	1.34
评价结果 assessment result	中度污染 moderate pollution	清洁 clean	清洁 clean	轻度污染 light pollution	中度污染 moderate pollution	中度污染 moderate pollution	中度污染 moderate pollution	轻度污染 light pollution	轻度污染 light pollution

注: 括号中数值为基准值, mg/kg.

Note: The data in brackets are standards, mg/kg.

染, 88.26% 的样品中 TP 属轻度到中度污染, 整体上池塘沉积物中 N 为中度污染, P 为轻度污染, N、P 综合为中度污染, 表明池塘沉积物已受污染, 但多数底栖生物可以承受; 以美国环境保护局制定的底泥分类 N、P 最低标准<sup>[14]</sup>和中国东部浅水湖泊沉积物 N、P 基准阈值<sup>[45]</sup>为评价基准, 池塘沉积物中 N、P 风险评价结果一致, 72.3%~82.63% 的样品中 TN 属清洁等级, 92.02%~96.24% 的样品中 TP 处中度到重度污染, 整体上池塘沉积物中 N 为清洁状态, P 为中度污染。有机指数法评价结果表明(图 7), 处清洁和轻度污染等级的样品占比分别为 59.57% 和 36.42%, 鱼、虾、蟹塘沉积物 Org-Index 平均值分别为 0.069、0.069 和 0.049, 整体处清洁至轻度有机污染状态, 极少样品(4.02%)为中度及重度有机污染, 多来自鱼塘和虾塘。

2.6 重金属风险评价

以 1990 年中国环境监测总站发布的《中国土壤元素背景值》<sup>[46]</sup>中上海市表层 0~20 cm 土壤中

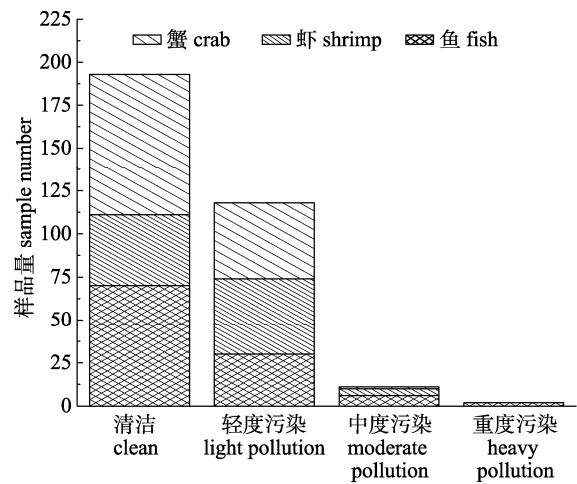


图 7 上海地区池塘沉积物样品有机指数法污染分级样品量分布柱状图

Fig. 7 Histogram of pollution grading sample amount of pond sediments by organic index method in Shanghai

重金属背景值为标准的重金属地质累积指数评价结果(表 7)表明, 96.63% 样品中各重金属处于清洁等级, 轻度污染、偏中度污染和重度污染等级的

样品平均占比分别为 2.74%、0.56%和 0.08%，主要涉及指标为 Cd。

以上海市土壤重金属背景值为参考值的潜在生态危害指数(RI)评价结果显示，统计表明，100%沉积物样品中 Cu、Zn、Pb、Cr 和 As 的单因子潜在生态危害指数( $E_r$ )均处低风险等级，Hg 为低风险等级和中度风险等级的样品占比分别为 89.4%和 10.6%，Cd 为低风险等级、中度风险等级和高度及严重风险等级的样品占比分别为 82.5%、13.89%和 3.6%。重金属中 Cd 的单因子潜在生态危害系数最高，平均为 33.69，养殖品种间无显著差异( $P>0.05$ )。综合潜在生态危害指数(RI)统计显示 96.9%的样品处低风险等级，处中度风险等级和高度风险等级的样品占比分别为 2.7%和 0.28%，池塘沉积物整体上处低潜在生态风险，不同养殖品种比较而言，虾塘沉积物重金属潜在生态风险相对较高。

对比淡水沉积物一致性沉积物质量基准(CBSQGs)阈值(图 8)，所有样品中 Cu、Zn、Pb、Cd、Hg 和 As 含量均低于其 PECs，2.5%的样品中 Cr 含量高于  $PEC_{Cr}$ ，涉及养殖品种为鱼、虾、蟹，且来自不同采样点位。沉积物重金属含量介于 TECs 和 PECs 之间的样品占比由高至低分别为 Cr (54.44%)、As (20.28%)、Cu (6.67%)、Zn (1.67%)、Hg (1.11%)和 Cd (0.28%)，所有样品中 Pb 含量均低于  $TEC_{Pb}$ ，可见个别沉积物中 Cr 很可能对底栖生物产生毒性效应，而大多沉积物样品中 Pb、Cd、Hg、Zn、Cu 和 As 不太可能引发底栖生物毒性效应。54.44%样品的中 Cr 和 20.28%样品中的 As 含量介于其 TECs 和 PECs 之间，此类样品中 Cr 和 As 对底栖生物的毒性效应不能界定，但其可能生物毒性效应水平随污染物浓度的增加而呈递增态势<sup>[17]</sup>。根据 CBSQGs 法使用指南<sup>[47]</sup>中对生物毒性等级划分方法(表 8)，Cr 含量位于生

表 7 上海地区养殖池塘沉积物样品重金属污染风险指数均值汇总

Tab. 7 Summary of heavy metal pollution index in sediment samples of aquaculture ponds in Shanghai

指数 index	种类 species	样品量 number of samples	Cu (27.2)	Zn (81.3)	Pb (25)	Cd (0.138)	Cr (70.2)	Hg (0.095)	As (9.1)
$I_{geo}$	鱼 fish	124	-1.00 <sup>a</sup>	-1.08 <sup>a</sup>	-1.58 <sup>a</sup>	-0.85 <sup>a</sup>	-1.17 <sup>a</sup>	-1.84 <sup>a</sup>	-0.97 <sup>a</sup>
	虾 shrimp	102	-0.88 <sup>a</sup>	-0.82 <sup>b</sup>	-1.36 <sup>b</sup>	-0.57 <sup>b</sup>	-1.13 <sup>a</sup>	-1.26 <sup>b</sup>	-0.79 <sup>b</sup>
	蟹 crab	134	-1.00 <sup>a</sup>	-1.01 <sup>a</sup>	-1.50 <sup>ab</sup>	-0.48 <sup>b</sup>	-1.22 <sup>a</sup>	-1.35 <sup>b</sup>	-0.86 <sup>ab</sup>
	总计 total	360	-0.96	-0.98	-1.49	-0.63	-1.18	-1.49	-0.88
	污染等级 pollution class		清洁 clean	清洁 clean	清洁 clean	清洁 clean	清洁 clean	清洁 clean	清洁 clean
单因子污染风险指数 $E_r$	鱼 fish	124	4.06 <sup>A</sup>	0.77 <sup>A</sup>	2.84 <sup>A</sup>	29.92 <sup>A</sup>	1.42 <sup>A</sup>	21.03 <sup>A</sup>	8.18 <sup>A</sup>
	虾 shrimp	102	4.17 <sup>A</sup>	0.89 <sup>B</sup>	3.19 <sup>A</sup>	33.79 <sup>A</sup>	1.44 <sup>A</sup>	28.04 <sup>B</sup>	9.09 <sup>B</sup>
	蟹 crab	134	3.92 <sup>A</sup>	0.78 <sup>A</sup>	2.91 <sup>A</sup>	37.09 <sup>A</sup>	1.38 <sup>A</sup>	27.11 <sup>B</sup>	8.63 <sup>AB</sup>
	总计 total	360	4.04	0.81	2.97	33.69	1.41	25.28	8.60
	污染等级 pollution class		低风险 low risk	低风险 low risk	低风险 low risk	低风险 low risk	低风险 low risk	低风险 low risk	低风险 low risk

注: 列中标有相同上标字母的两均值差异不具显著性( $P>0.05$ )。括号中数值为重金属背景值, mg/kg.

Note: No significant difference between two mean values marked with the same superscript in the same column ( $P>0.05$ ). The data in brackets are background data, mg/kg.

表 8 CBSQGs 法等级分布表

Tab. 8 Descriptive concern level scheme

等级 level of concern	阈值效应浓度 threshold effect concentration (TEC)	等级 level of concern	效应浓度中值 midpoint effect concentration (MEC)	等级 level of concern	可能效应浓度 probable effect concentration (PEC)	等级 level of concern
第 1 级	CBSQG TEC 限值	第 2 级	$MEC=(TEC+PEC)/2$	第 3 级	CBSQG PEC 限值	第 4 级
$\leq TEC$		$TEC <$ $C_{致污物} \leq MEC$		$MEC <$ $C_{致污物} \leq PEC$		$> PEC$

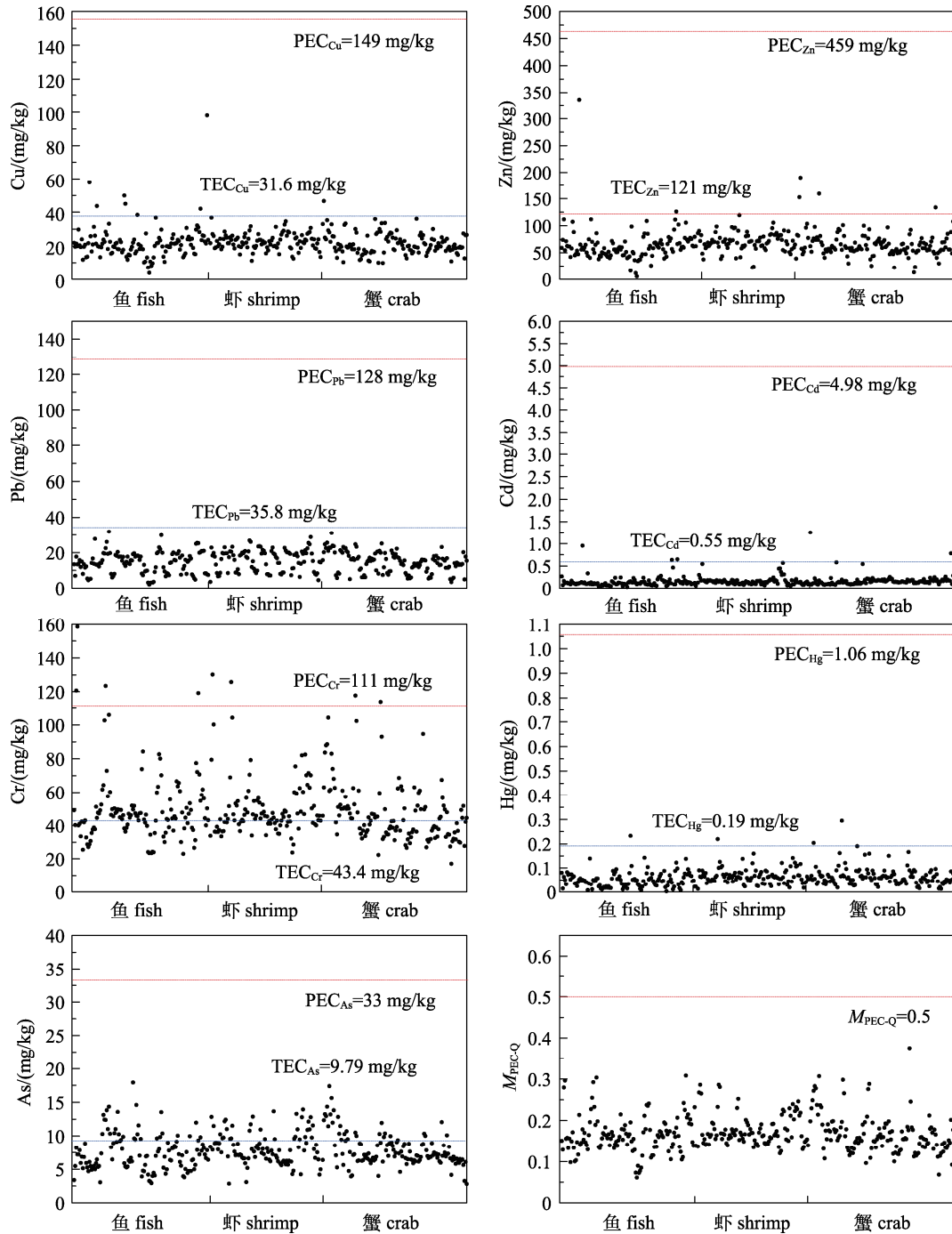


图 8 上海地区养殖池塘沉积物样品中重金属含量及平均可能效应浓度商分布散点图

Fig. 8 Scatter of heavy metal concentrations and mean PEC quotient in sediment of aquaculture ponds in Shanghai

物毒性 2 级的样品占比 48.89%，Cr 生物毒性 3 级的样品占比 5.56%，As 含量介于 TECs 和 PECs 之间的样品生物毒性等级均为 2 级。所有沉积物样品平均可能效应浓度商 ( $M_{PEC-Q}$ ) 均低于 0.5，平均为 0.168，重金属综合生物毒性效应评价结果显示池塘沉积物不会引发生物毒性效应。

### 3 讨论

#### 3.1 池塘沉积物质量现状

研究表明上海地区池塘沉积物 N、P、TOC 及重金属的平均分布相对较低，本地淡水鱼养殖正向休闲渔业转型，渔产量不再是养殖户首要目

的, 投饵量的降低、水质及底质管理措施的加强(如晒塘、养殖过程中微生物制剂的添加)等均使养殖环境得到改善。本地凡纳滨对虾的养殖多为一年两造, 养殖期间虾塘水质相对较肥<sup>[48]</sup>, 养殖结束后沉积物表层富含有机质的土壤颗粒被外排水带走, 晒塘等操作使池塘底泥土壤氧化, 促进有机物质分解。中华绒螯蟹养殖期间池塘种植大量水草, 水草可为河蟹提供食物, 起到遮蔽作用, 还对池塘沉积物中 N、P、有机质等有良好净化效果<sup>[49]</sup>, 虾、蟹的底部扰动同样会加剧表层沉积物有机物质矿化。本地凡纳滨对虾养殖期间调水剂和底质改良剂添加量普遍较鱼塘和蟹塘高, 这可能是虾塘沉积物中部分重金属(Zn、Hg)平均含量相对较高的原因之一, 外源添加剂是池塘生态系统中重金属的来源之一<sup>[50]</sup>。

### 3.2 沉积物风险评价

池塘沉积物中氮磷综合污染指数风险评价结果因背景值不同而差异较大, 对比文中引用的三种 N、P 背景值, 中国东部浅水湖泊 TN、TP 阈值同 EPA 标准限值相当, 而 TN 阈值是安大略省 TN 基准值的 2 倍多, TP 阈值是安大略省 TP 基准值的 0.7 倍左右, 安大略省制定的沉积物质量评价基准对 N 的要求最高。不同于前两种 N、P 背景值, 安大略省标准值是根据沉积物中污染物对底栖生物的生态毒性效应制定, 具有生物效应表征, 在此标准下本地池塘沉积物中 N、P 已受污染, 但在底栖生物可承受范围内, 从不具有生物效应表征的基准值评价, 池塘沉积物中 N 累积量较低, P 的相对累积量较高。N、P 累积水平不同的主要原因与 N、P 循环特性有关, P 是典型的沉积型循环, 在土壤中多以难溶化合物形式存在, N 更易通过各种生化反应进入水-大气-土壤循环, 循环速度显著高于 P<sup>[51]</sup>。池塘沉积物中 N、P 的来源同 TOC 紧密相关, 结合有机指数评价结果看, 以 N、P 自然背景值为基准对池塘沉积物中 N、P 风险评价更为合适。

地质累积指数和潜在生态风险评价结果表明上海地区养殖池塘沉积物中重金属整体上处清洁和低风险等级, 其中 Cd 的累积现象较其他重金属重。饲料是池塘沉积物中 Cd 的主要来源之一,

饲料中过量的 Cd 主要来自一些动物性原料、矿物质添加剂等<sup>[52]</sup>, 有研究结果显示长三角淡水养殖池塘沉积物样品中 Cd 的超标率达 67%, 水产品中 Cd 的污染情况最为严重, 存在食用安全隐患, 沉积物中 Cd 的累积状况需引起高度关注, 养殖过程中饲料品质及用量的掌控对营造健康养殖环境, 提高水产品品质极为重要<sup>[53]</sup>。

一致性沉积物质量基准法(CBSQGs)预测上海地区池塘沉积物整体上无生物毒性效应, 但个别沉积物样品中 Cr 引发生物毒性效应的概率很大, 不同于其他两种方法评价 Cd 的风险相对较高的结论。导致此差异的原因之一为评价标准值不同, CBSQGs 中大多重金属 TECs 值是上海市土壤背景值的 1~2 倍左右, 而  $TEC_{Cd}$  是  $C_s^{Cd}$  的 7 倍多,  $TEC_{Cr}$  仅为  $C_s^{Cr}$  的 50% 倍, 可见 CBSQGs 中对 Cd 的无生物毒性要求标准较低, 对 Cr 的要求较严格。其二, CBSQGs 法是基于沉积物中致污物对底栖生物的毒性反应浓度作出的预测, 具生物效应表征, 地质累积指数评价法将沉积物中致污物浓度与其背景值比较, 其结果反映致污物的外源累积状况, 潜在生态风险评价法在对比致污物背景值的基础上考虑了不同致污物的毒性效应, 不同重金属毒性效应系数差异较大,  $T_r^{Cd}$  为  $T_r^{Cr}$  的 15 倍。另外, CBSQGs 法不涉及水生环境中致污物的生物富集、食物链转移以及对其他野生动物或人类的影响, 有其明显的使用局限性, 如该法不适用生物富集型化合物(多氯联苯、甲基汞等)的生物毒性预测<sup>[46]</sup>, 对 Hg 的无毒性预测概率仅为 35%<sup>[17]</sup>, 因此利用多种评价方法评估沉积物中重金属生态风险, 可为我们提供更加综合且全面的评估信息。

## 4 结论

2016—2019 年上海地区淡水养殖池塘 0~20 cm 层沉积物中 TN、TP 和 TOC 的含量范围分别为 287.24~2683.24 mg/kg、216.84~1755.69 mg/kg 和 1.41~19.78 mg/g, 平均分布均无养殖种类间差异, 年际间年均值差异不显著( $P>0.05$ )。TN、TP 和 TOC 之间相关性显著( $P<0.05$ ), 共同来源于池塘内部沉降。沉积物营养盐综合污染指数和有机

指数法评价结果表明沉积物中 N 和有机物的累积量较低, P 累积量相对较高, 但低于其他地区高产池塘。

沉积物中重金属 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Hg 和 As 的平均含量分别为(22.15±6.63) mg/kg、(66.96±21.93) mg/kg、(14.89±5.82) mg/kg、(0.17±0.14) mg/kg、(50.13±19.45) mg/kg、(0.063±0.038) mg/kg 和(7.69±2.53) mg/kg, 凡纳滨对虾塘中 Zn 平均分布显著高于淡水鱼塘和中华绒螯蟹塘( $P<0.05$ ), 虾塘和蟹塘中 Hg 平均分布显著高于鱼塘( $P<0.05$ ), 其他重金属平均分布无显著品种差异( $P>0.05$ )。沉积物样品中 Zn、Pb 和 As 均无超标现象, Cr、Cd、Cu 和 Hg 样品超标率分别为 6.42%、4.13%、3.21% 和 1.38%。地质累积指数法、潜在生态危害指数法和一致性沉积物质量基准评价结果表明上海地区池塘沉积物中重金属整体上处于清洁等级、低潜在生态危害和不会引发生物毒性效应状态, 部分池塘沉积物中 Cd 和 Cr 的累积仍需引起密切关注。

#### 参考文献:

- [1] Burton G A, Johnston E L. Assessing contaminated sediments in the context of multiple stressors[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2010, 29(12): 2625-2643.
- [2] Seitzinger S P. Denitrification in freshwater and coastal marine ecosystems: Ecological and geochemical significance[J]. *Limnology and Oceanography*, 1988, 33(4P<sub>2</sub>): 702-724.
- [3] Ribeiro G S, Rizzo A, Sanchez R, et al. Heavy metal inputs in northern Patagonia lakes from short sediment core analysis[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2005, 265: 481-493.
- [4] Masson M, Blanc G, Schäfer J. Geochemical signals and source contributions to heavy metal (Cd, Zn, Pb, Cu) fluxes into the Gironde estuary via its major tributaries[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 370:133-146.
- [5] Wu B, Song J M, Li X G. Environmental characteristics of heavy metals in surface sediments from the Huanghe Estuary[J]. *Environmental Science*, 2013,34(4): 1324-1332. [吴斌, 宋金明, 李学刚. 黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征[J]. *环境科学*, 2013, 34(4): 1324-1332.]
- [6] Li F F, Huang D Z, Lian H, et al. Distribution characteristics and pollution assessment of nitrogen, phosphorus and organic matter in the surface sediments of Dongting Lake and its lake inlets[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018,27(12): 2307-2313. [李芬芳, 黄代中, 莲花. 洞庭湖及其入口表层沉积物氮、磷、有机质的分布及污染评价[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(12): 2307-2313.]
- [7] Jiang W Y, Zeng Z X. Distribution of heavy metals in surface sediment of Yuqiao reservoir and its relationship with macroinvertebrate community[J]. *Journal of Hydroecology*, 2019, 40(5): 32-39. [江文渊, 曾珍香. 于桥水库表层沉积物重金属分布特征及其与底栖动物的关系[J]. *水生生态学杂志*, 2019, 40(5): 32-39.]
- [8] Yue W Z, Huang X P, Sun C C. Distribution and pollution of nitrogen and phosphorus in surface sediment from the Pearl River estuary[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2007, 38(2): 111-117. [岳维忠, 黄小平, 孙翠慈. 珠江口表层沉积物中氮、磷的形态分布特征及污染评价[J]. *海洋与湖沼*, 2007, 38(2): 111-117.]
- [9] Wang J Y, Ma D Y, Bao Y E, et al. Evaluation on sediment quality in Yellow Sea and East China Sea[J]. *Marine Environmental Science*, 2003, 22(4): 21-24. [王菊英, 马德毅, 鲍永恩, 等. 黄海和东海海域沉积物的环境质量评价[J]. *海洋环境科学*, 2003, 22(4): 21-24.]
- [10] Chang J, Tian X L, Dong S L, et al. An experimental study on nitrogen and phosphorus budgets in polyculture of shrimp, bivalve and seaweed[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2006, 36(Sup.): 3-39. [常杰, 田相利, 董双林, 等. 对虾、青蛤和江蓠混养系统氮磷收支的实验研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2006, 36(增刊): 3-39.]
- [11] Li J L, Chen X F, Lai Q M, et al. Study on nitrogen and phosphorus budgets and production performance in higher place pond of *Litopenaeus vannamei*[J]. *South China Fisheries Science*, 2010, 6(5): 13-20. [李金亮, 陈雪芬, 赖秋明, 等. 凡纳滨对虾高位池养殖氮、磷收支研究及养殖效果分析[J]. *南方水产*, 2010, 6(5): 13-20.]
- [12] HJ 803-2016 Soil and sediment-Determination of aqua regia extracts of 12 metal elements-Inductivel coupled plasma mass spectrometry[S]. Beijing: China Environmental Science Press,2016. [HJ 803-2016 土壤和沉积物 12 种金属元素的测定王水提取-电感耦合等离子体质谱法[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.]
- [13] HJ 680-2013 Soil and sediment-Determination of mercury, arsenic, selenium, bismuth, antimony-Microwave dissolution/Atomic Fluorescence Spectrometry[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013. [HJ 680-2013 土壤和沉积物汞、砷、硒、铋、锑的测定 微波消解/原子荧光法[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.]
- [14] Wang P, Lu S Y, Wang D W, et al. Nitrogen, phosphorus and organic matter spatial distribution characteristics and their pollution status evaluation of sediments nutrients in lakeside zones of Taihu Lake[J]. *China Environmental*

- Science, 2012,32(4): 703-709. [王佩, 卢少勇, 王殿武, 等. 太湖湖滨带沉积物氮、磷、有机质分布与污染评价[J]. 中国环境科学, 2012, 32(4): 703-709.]
- [15] Sui G R. Statement and evaluation of organic matter, total nitrogen and total phosphate in surface layer sediments in Taihu Lake[J]. Journal of Lake Science, 1996, 8(4): 319-324. [隋桂荣. 太湖表层沉积物中 OM、TN、TP 的现状与评价[J]. 湖泊科学, 1996, 8(4): 319-324.]
- [16] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment logical approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [17] MacDonald D D, Ingersoll C G, Berger T A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2000, 39(1): 20-31.
- [18] Yuan Y X, Cui Y, Qu K M, et al. Vertical distribution of TOC, TP, TN and pH in sediment environment of shrimp culture ponds[J]. Journal of Fisheries of China, 1999, 23(4): 363-368. [袁有宪, 崔毅, 曲克明, 等. 对虾养殖池沉积环境中 TOC、TP、TN 和 pH 垂直分布[J]. 水产学报, 1999, 23(4): 363-368.]
- [19] You K, Ma S. Preliminary study on organic carbon in shrimp cultural ecosystems[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2001, 32(1): 51-55. [游奎, 马旻. 对虾养殖生态系中有机碳的初步研究[J]. 青岛海洋大学学报, 2001, 32(1): 51-55.]
- [20] Wang Y, Qi Z X. Effects of culture modes on concentration of nitrogen, phosphorus and organic carbon in bottom soil from seawater experimental enclosures[J]. Marine Sciences, 1999, 23(4): 1-3. [王岩, 齐振雄. 不同养殖方式对海水实验围隔底泥中氮、磷和有机碳含量的影响[J]. 海洋科学, 1999, 23(4): 1-3.]
- [21] Jia C X, Zhang Q J, Liu P, et al. Heavy metal distribution and pollution characteristics in sediments of aquaculture ponds in Beijing area[J]. Fisheries Science, 2011, 30(1): 17-21. [贾成霞, 张清靖, 刘盼, 等. 北京地区养殖池塘沉积物中重金属的分布及污染特征[J]. 水产科学, 2011, 30(1): 17-21.]
- [22] Li X W, Qiao Y M, Yang Y F. Preliminary study on nitrogen and phosphorus in surface sediment of culture pond in suburb of Guangzhou[J]. Reservoir Fisheries, 2008, 28(1): 74-77. [李小伟, 乔永民, 杨宇峰. 广州市郊养殖池塘表层沉积物中氮磷的初步研究[J]. 水利渔业, 2008, 28(1): 74-77.]
- [23] Liu P. A preliminary study on budget and variation of organic carbon, nitrogen and phosphorus of grass carp in different polyculture systems[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012. [刘朋. 草鱼不同混养系统有机碳、氮和磷收支及变动的初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.]
- [24] Zhang J T. Studies on water and soil quality in polycultured ponds of *Litopenaeus vannamei* and *Cyclina Sinensis*[D]. Shijiazhuang: Hebei University, 2004. [张江涛. 凡纳滨对虾和青蛤混养池塘水质及沉积物的研究[D]. 石家庄: 河北大学, 2004.]
- [25] Feng Q F, Zang W L, Dai X L, et al. Sulfide content in sediment of *Macrobrachium rosenbergii* culture ponds and relationship between sulfide content and other parameters[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(12): 175-182, 188. [冯奇飞, 藏维玲, 戴习林, 等. 罗氏沼虾养殖池塘沉积物硫化物含量及其与其他因子关系的研究[J]. 广东农业科学, 2014, 41(12): 175-182, 188.]
- [26] Cheng J P, Liu C E, Wang W H. Transportation and accumulation of mercury and other heavy metal in water-biofilm-sediment system of Huangpu River[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(6): 767-772. [程金平, 刘彩娥, 王文华. 汞等重金属元素在黄浦江中迁移富集研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(6): 767-772.]
- [27] Kang L J. Characteristics and risk evaluation of carbon, nitrogen and phosphorus in sediments of the Dianshan Lake[J]. Resources and Environmental in the Yangtze Basin, 2012, 21(Sup1): 105-110. [康丽娟. 淀山湖沉积物碳、氮、磷分布特征与评价[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(Z1): 105-110.]
- [28] Boyd C E, Tanner M E, Madkour M, et al. Chemical characteristics of bottom soils from freshwater and brackishwater aquaculture ponds[J]. Journal of World Aquaculture Society, 1994, 25(4): 517-534.
- [29] Wang Y H, Qian S M, Xu N N, et al. Characteristics of distribution of pollutants and evaluation in sediment in the east area of Chaohu Lake[J]. Research of Environmental Science, 2004, 17(6): 22-26. [王永华, 钱少猛, 徐南妮, 等. 巢湖东区沉积物污染物分布特征及评价[J]. 环境科学研究, 2004, 17(6): 22-26.]
- [30] Clude E B. Bottom Soils, Sediment, and Pond Aquaculture[M]. Lin W H. Guangzhou: Guodong Science and Technology Press, 2004. [克劳德 E. 博伊德. 池塘养殖沉积物[M]. 林文辉译. 广州: 广东科技出版社, 2004.]
- [31] Feng F, Fang T, Liu J T. Vertical distribution of species of nitrogen and phosphorus in the sediments of Lake Donghu[J]. Environmental Science, 2006, 27(6): 1078-1082. [冯峰, 方涛, 刘剑彤. 武汉东湖沉积物氮磷形态垂向分布研究[J]. 环境科学, 2006, 27(6): 1078-1082.]
- [32] Tu J F, Luo Q, Wu Y Q, et al. The study on the heavy metal pollution of aquatic feed in Fujian[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(29): 76-79. [涂杰峰, 罗钦, 伍云卿, 等. 福建水产饲料重金属污染研究[J]. 中国农学通报,

- 2011, 27(29): 76-79.]
- [33] NY/T 5361-2016 Pollution-free agricultural product Environmental conditions of fresh-water farming area[S]. The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2016. [NY/T 5361-2016 无公害农产品淡水养殖产地环境条件[S]. 中华人民共和国农业部, 2016.]
- [34] GB 18668-2002 Marine sediment quality[S]. National Marine Environmental Monitoring Center, State Oceanic Administration, 2002. [GB 18668-2002 海洋沉积物质量[S]. 国家海洋局, 国家海洋环境监测中心, 2002.]
- [35] Zhang J, Guo X Y, Zeng Y, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in river sediments from Lake Taihu basin[J]. Environmental Science, 2019, 40(5): 2201-2210. [张杰, 郭西亚, 曾野, 等. 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2201-2210.]
- [36] Zhang F, Sun Z Z, Zhang Y P. Distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in important fishery waters of Yangtze estuary[J]. Fisheries Science & Technology Information, 2017, 44(4): 177-180. [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估[J]. 水产科技情报, 2017, 44(4): 177-180.]
- [37] Shi Q X, Zhao H Q, Wang J, et al. Potential ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in surface sediments from aquaculture ponds in Huzhou city[J]. Freshwater Fisheries, 2015, 45(6): 80-84. [施沁旋, 赵汉取, 王俊, 等. 湖州市养殖池塘表层沉积物重金属风险评价及其来源分析[J]. 淡水渔业, 2015, 45(6): 80-84.]
- [38] Nriagu J O, Pacyna J M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils with trace metals[J]. Nature, 1988, 333: 134-139.
- [39] Qu W C, Dickman M, Wang S M. Multivariate analysis of heavy metal and nutrient concentrations in sediments of Taihu Lake, China[J]. Hydrobiologia, 2001, 450: 83-89.
- [40] Liu M, Yuan J L, Ni M, et al. Study on the restoration of heavy metal copper pollution in the sediments of aquaculture ponds by three submerged plants[J]. Freshwater Fisheries, 2019, 49(3): 83-89. [刘梅, 原居林, 倪蒙, 等. 沉水植物对淡水养殖池塘沉积物重金属 Cu 污染的修复研究[J]. 淡水渔业, 2019, 49(3): 83-89.]
- [41] Suthar S, Nema A K, Chabukdhara M, et al. Assessment of metals in water and sediments of Hindon River, India: Impact of industrial and urban discharges[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 171: 1088-1095.
- [42] Chen Z L, Xu S Y, Liu L, et al. Spatial distribution and accumulation of heavy metals in tidal flat sediments of Shanghai coastal zone[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(6): 641-651. [陈振楼, 许世远, 柳林, 等. 上海滨岸潮滩沉积物重金属元素的空间分布与累积[J]. 地理学报, 2000, 55(6): 641-651.]
- [43] Lin J Y, Chen W F, Chen H Z, et al. Studies on the chemical forms of Cd in aquatic feeds and its bioaccumulations[J]. Journal of Applied Oceanography, 2008, 27(4): 491-498. [林建云, 陈维芬, 陈涵贞, 等. 水产饲料中镉的存在形态及其在养殖动物体内累积状况的研究[J]. 台湾海峡, 2008, 27(4): 491-498.]
- [44] Li R W. Contamination of sediments and environmental sedimentology[J]. Advance in Earth Sciences, 1998, 13(4): 398-402. [李任伟. 沉积物污染和环境沉积学[J]. 地球科学进展, 1998, 13(4): 398-402.]
- [45] Wang J, Zhang J T, Zan F Y, et al. Study on sediment TN and TP criteria in eastern shallow lakes, China[J]. Ecology and Environmental Science, 2014, 23(6): 992-999. [王健, 张婧天, 咎逢宇, 等. 中国东部浅水湖泊沉积物总氮总磷基准阈值研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(6): 992-999.]
- [46] China National Environmental Monitoring Centre. Background Values of Chinese Soil Elements[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 330-382. [中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 330-382.]
- [47] Contaminated Sediment Standing Team. Consensus-based sediment quality guidelines recommendations for use & application (WT-732 2003)[S]. 2003: 16-17.
- [48] Sun Z Z, Liu J J, Zhang Y Y. Distribution of nitrogen and phosphorus in waters of freshwater aquaculture in Shanghai[J]. Fisheries Science, 2018, 37(4): 512-521. [孙振中, 刘金金, 张玉平. 上海市淡水养殖水体中氮磷的分布研究[J]. 水产科学, 2018, 37(4): 512-521.]
- [49] Tian G T, Xu G J, Li Z, et al. Synergistic purification effect of higher aquatic plants and benthic animals on the substrate environment of *Eriocheir sinensis* culture[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2019, 47(12): 212-215. [田功太, 许国晶, 李壮, 等. 高等水生植物与底栖动物对中华绒螯蟹养殖底质环境的协同净化效果[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(12): 212-215.]
- [50] Pal D, Maiti S K. Seasonal variation of heavy metals in water, sediment, and highly consumed cultured fish (*Labeo rohita* and *Labeo bata*) and potential health risk assessment in aquaculture pond of the coal city, Dhanbad (India)[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25: 12464-12480.
- [51] Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.]

- [52] Lin J B, Li J Q, Song G H. Aquatic feed safety and aquatic product quality[J]. Reservoir Fisheries, 2008, 28(2): 112-114. [林建斌, 李金秋, 宋国华. 水产饲料安全与水产品质量[J]. 水利渔业, 2008, 28(2): 112-114.]
- [53] He Q. Pollution evaluation and bioavailability of heavy met-

als and polycyclic aromatic hydrocarbons in pond aquaculture products in the Yangtze River delta[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018. [和庆. 长三角地区池塘养殖水产品重金属和多环芳烃污染评价及其生物有效性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.]

## Risk assessment of nitrogen, phosphorus, organic carbon, and heavy metals in Shanghai aquaculture ponds

ZHANG Yuping, LIU Jinjin, ZHANG Fen

Shanghai Fisheries Research Institute, Shanghai Fisheries Environment Monitoring Station, Shanghai 200433, China

**Abstract:** To assess the sediment environmental quality synthetically from Shanghai aquaculture ponds, 360 sediment samples collected from 36 farms from 2016 to 2019 were investigated and the distribution characteristics of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total organic carbon (TOC), and heavy metals (Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, Hg, As) were analyzed. The results showed there was no significant difference between the average concentrations of TN, TP, TOC, and those heavy metals in the 0-10 cm and 10-20 cm layers. The mean values of TN, TP, and TOC (dry weight) in the surface 20 cm pond sediment were  $(873.37 \pm 352.45)$  mg/kg,  $(685.66 \pm 199.66)$  mg/kg, and  $(6.62 \pm 3.05)$  mg/g respectively, and in pond sediments there was a significant positive correlation among them. Methods of comprehensive index and the organic index were used to evaluate the accumulation of nitrogen, phosphorus and organic matter, and the results indicated that the nitrogen and organic matter accumulation in pond sediments was relatively low and phosphorus accumulation was high, but was still lower than the high-yielding ponds in other areas. The over-limit ratio of Cr, Cd, Cu, and Hg was 6.42%, 3.21%, 4.13%, and 1.38%, respectively and concentrations of Zn, Pb, and As in all samples met the certain criteria. The sediment assessment was conducted using a geo-accumulation index ( $I_{geo}$ ), potential ecological risk index (RI), and consensus-based sediment quality guidelines (CBSQGs). Results of the risk assessment indicated that, generally, Shanghai pond sediments were unpolluted, had a low ecological risk, and were nontoxic.

**Key words:** pond sediment; nitrogen, phosphorus and organic carbon; heavy metal; risk assessment

**Corresponding author:** ZHANG Yuping. E-mail: zhangyp@msn.com