

上海黄浦江水系常见鱼类重金属含量及健康风险评估

张亚^{1,2}, 唐振¹, 郭弘艺¹, 唐文乔^{1,3}

1. 上海海洋大学海洋动物系统分类与进化上海高校重点实验室, 上海 201306

2. 水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306

3. 水产种质资源发掘与利用省部共建教育部重点实验室, 上海 201306

摘要:黄浦江是兼具饮用水源、航运、排洪排涝、渔业、旅游等功能的上海“母亲河”, 鱼类资源丰富。为了解黄浦江水系鱼类重金属污染状况, 测定了黄浦江水系 15 种优势鱼类和主要经济鱼类肌肉中 Cu、Zn、Fe、Mn、Pb、Cd、Cr、As、Hg 的含量。结果表明, 除 As 外, 所有鱼体中的重金属含量均低于国家标准限值或农业行业标准限值。综合污染指数分析结果显示, 淀山湖水域翘嘴鲌、大鳍鲌为重金属中度污染 ($2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$), 鲮为重度污染 ($P_{\text{综}} > 3.0$); 苏州河水域翘嘴鲌、兴凯鲌为中度污染, 大鳍鲌为重度污染。健康风险分析结果显示, 除 As 外, Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Hg、Mn 等的健康风险指数均小于 1, 对人群的健康风险不显著。复合重金属危害系数 (TTHQ) 分析结果显示: 黄浦江水域似鳊的 TTHQ 值为 0.957; 苏州河水域光泽黄颡鱼、刀鲚、似鳊、翘嘴鲌、鲮、大鳍鲌、日本鳊、兴凯鲌的 TTHQ 值均大于 1; 淀山湖水域泥鳅的 TTHQ 值接近 1, 翘嘴鲌、黄颡鱼、鲮、大鳍鲌的 TTHQ 值大于 1。以上鱼类均存在复合重金属健康风险。目前, 淀山湖水域仍有专业渔民开展捕捞作业, 因此, 应对当地居民重金属健康风险作长期监测。

关键词:黄浦江; 苏州河; 淀山湖; 鱼类重金属污染; 人类健康风险

中图分类号: X826 文献标志码: A 文章编号: 1002-6002(2024)04-0153-13

DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2024.04.16

Heavy Metal Content and Health Risk Assessment of Common Fish in the Huangpu River System

ZHANG Ya^{1,2}, TANG Zhen¹, GUO Hongyi¹, TANG Wenqiao^{1,3}

1. Shanghai Universities Key Laboratory of Marine Animal Taxonomy and Evolution, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

2. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai 201306, China

3. Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: The Huangpu River is the mother river of Shanghai with functions such as drinking water source, shipping, flood and waterlogging drainage, fishing and tourism, and is rich in fish resources. In order to understand the pollution status of heavy metals in fish in the Huangpu River system, the contents of Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, Fe, Mn, As and Hg in the muscles of 15 dominant fishes were determined based on the fish captured with the special investigation of fish communities. The results showed that the contents of heavy metals in all fish samples in the Huangpu River, Dianshan Lake and Suzhou River were lower than the national standard except As. The comprehensive pollution index shows that *Culter alburnus* and *Acheilognathus macropterus* were moderately polluted ($2.0 < P \leq 3.0$), and *Hemiculter leucisculus* was severely polluted ($P > 3.0$) in the Dianshan Lake. In the section of Suzhou River, *Culter alburnus* and *Acheilognathus chankaensis* were moderately polluted, and *Acheilognathus macropterus* was heavily polluted. In addition to As, the health risk index of Cu, Zn, Pb, Cr, Hg and Mn was less than 1, and the health risk to the population was not obvious. The total target hazard quotient (TTHQ) showed that the *Pseudobrama simoni* in the Huangpu River, the *Pelteobagrus nitidus*, *Coilia ectenes*, *Pseudobrama simoni*, *Culter alburnus*, *Hemiculter leucisculus*, *Acheilognathus macropterus*, *Anguilla japonica* and *Acheilognathus chankaensis* in the Suzhou River, the *Culter alburnus*, *Pelteobagrus fulvidraco*, *Hemiculter leucisculus* and *Acheilognathus macropterus* in Dianshan Lake were greater than or close to 1, there might be a relatively higher risk for dietary health. There are still strong fishing activity in Dianshan Lake after the fishing ban period, which has potential risk of heavy metal

收稿日期: 2022-09-15; 修订日期: 2023-04-08

基金项目: 上海市生态环境局骨干河道鱼类群落调查专项 (2021); 国家重点研发计划 (2018YFD0900802)

第一作者简介: 张亚 (1987-), 男, 湖北黄冈人, 博士, 工程师。

通讯作者: 唐文乔

enrichment, so long-term monitoring should be carried out.

Keywords: Huangpu River; Suzhou River; Dianshan Lake; heavy metals pollution of fishes; human health risks

在重金属元素中, Fe、Mn、Cu、Zn 等是人体新陈代谢所必需的元素, 但摄入量一旦超过一定阈值, 就可能发生毒性效应^[1]。不具备生理活性的 Cd、As、Hg 等元素会与蛋白质等发生强烈的相互作用, 危害内分泌系统, 造成慢性中毒^[2]。重金属一般具有毒性强、持续久和降解难等特点, 还会引起致癌、致畸、致突变效应^[3]。鱼类富含人体必需氨基酸、低饱和脂肪酸等有益物质, 是人体所需优质蛋白的重要补充来源^[4]。随着城市的发展, 都市河流接纳了大量由工农业废水、生活污水和地表径流携带的重金属元素^[5], 而生活在河流中的鱼类易从水体和沉积物中富集重金属元素, 并通过食物网的传递作用将其传递至人体。当人类食用受污染鱼类的量超过每日最大摄入量时, 就会产生显著的人体健康风险^[6]。

黄浦江是长江入海之前的最后一条支流, 其水系包含了上海市内的大多数河网, 兼有饮用水源、航运、排洪排涝、渔业、旅游等功能, 是上海城市发展的重要依赖。因此, 包括重金属污染在内的黄浦江污染问题受到政府、学者和公众的极大关注。目前, 已有许多有关黄浦江水体、表层沉积物和底栖动物等的重金属含量及污染评价的研究报道^[7-10]。黄浦江源头淀山湖、上游干流及主要支流苏州河上游所在的青浦、松江、金山、闵行和奉贤等区域渔业发达。对于上述区域的鱼类物种资源量和多样性, 有研究开展了专门调查^[11-20], 但对于当地野生鱼类的重金属含量, 目前仍未见相关报道。本文测定了黄浦江水系重要优势鱼类和常见经济鱼类的重金属元素含量, 分析了重金属污染状况及健康风险, 旨在为评价当地居民的膳食安全状况提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 样本采集时间和区域

租用持有捕捞许可证的专业渔船, 分别于 2013 年 11 月、2014 年 7 月在黄浦江上游支流、上游、中游和下游 4 个断面 (S1~S4, 水质为 II~IV 类), 2020 年 6—7 月、2020 年 9—10 月在淀山湖、黄浦江上游支流和黄浦江上游干流 3 个监测断面 (S5~S7, 水质为 II~IV 类), 2019 年 6 月、2019 年

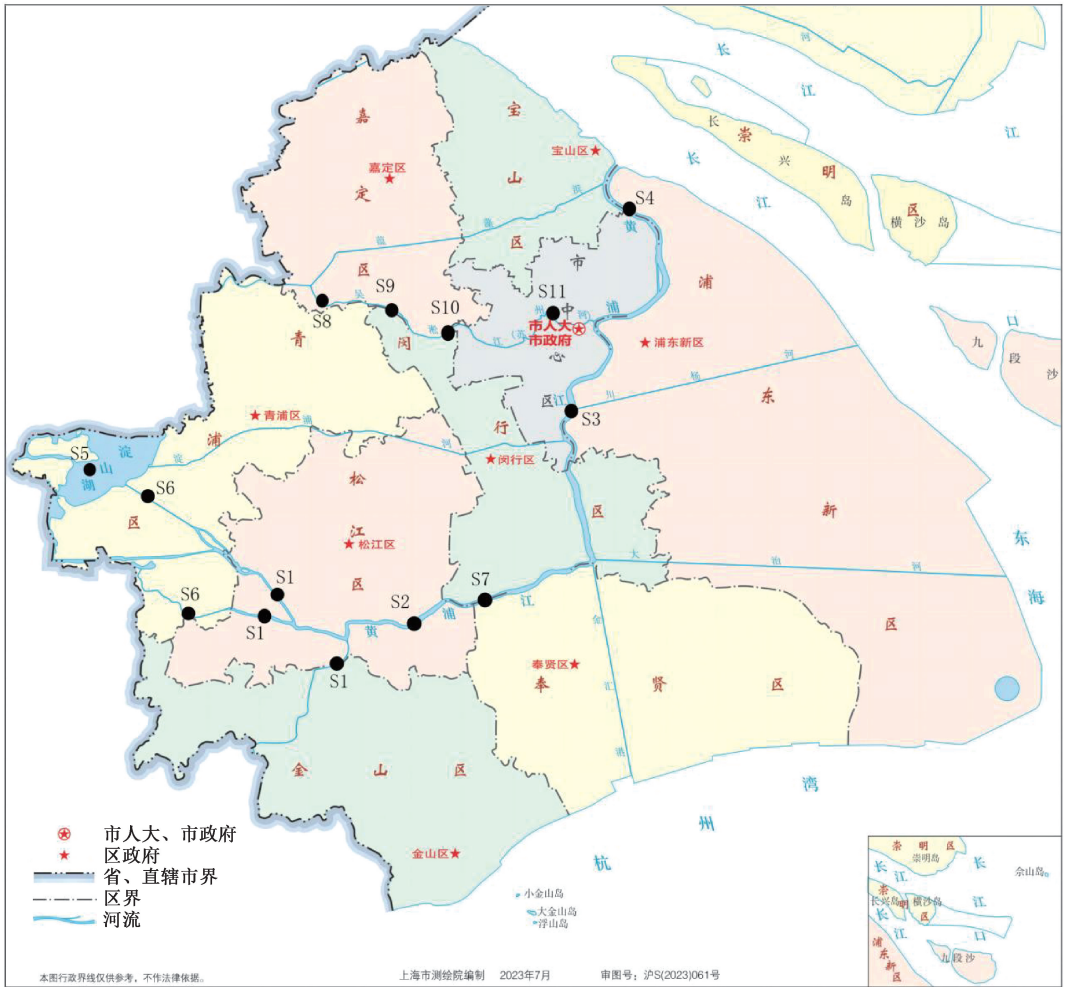
9 月在苏州河上游支流、上游、中游和下游 4 个断面 (S8~S11, 水质为 IV 类), 对鱼类样本进行了采集。具体的采集断面分布如图 1 所示。

1.2 鱼类样本采集和保存方法

在每一个采样点采用大型地笼网和 3 层深水刺网进行较大捕捞努力量的鱼类样本采集, 共获得鱼类样本 30 300 余尾^[14-15]。用 10% 的分析纯福尔马林固定鱼类样本, 采用塑料容器密封保存。将黄浦江水系分为淀山湖、黄浦江 (干流) 及苏州河 3 个水域单元, 选择主要优势种和重要经济种, 并考虑食性和水层代表性等, 合计选取 15 种鱼类作为分析对象, 具体样本信息见表 1。15 种鱼类包括刀鲚、似鳊、鲈、大鳍鱮、兴凯鱮和光泽黄颡鱼等优势种^[14-15], 以及居民日常喜食的鲢、鳊、黄颡鱼、鲫、泥鳅、革胡子鲶、翘嘴鲌、日本鳗鲡和乌鳢等。对于每种鱼类, 在 3 个水域单元各选 6 尾进行检测 (鲢、鳊、日本鳗鲡和革胡子鲶除外)。

1.3 样品处理与分析测定

将鱼类样品取出后, 用超纯水洗净其体表, 用陶瓷剪刀剪开其皮肤, 利用陶瓷镊子取少量背鳍起点处的肌肉, 并去除肌间刺。使用匀浆机将肌肉样品破碎后, 放置在 -80 °C 条件下冷冻 24 h 以上。将冷冻后的样品置于真空冷冻干燥机中, 冷冻干燥至恒重。准确称取 200~300 mg 冷冻干燥后的样品, 在石墨炉中密封消解 (130 °C, 240 min, HNO₃: HClO₄ 为 9:1)。待样品冷却后, 用超纯水定容至 40 mL, 在超声波清洗仪中混匀。取 2 mL 样品稀释至 10 mL, 上机检测。用电感耦合等离子体质谱法 (美国 Thermo Fisher Scientific, iCAP RQ ICP-MS) 测定 Cu、Zn、Pb、Cd、Fe、Cr、Mn、As、Hg 的含量。每次检测前, 绘制标准曲线, 其中 Hg 选用多元素 (As、Cd、Cr、Pb、Hg) 混合标准溶液 (上海阿拉丁生化科技股份有限公司, 产品编号为 S140883) 进行校正, 其余元素使用 ICP 多元素标准液 VI (德国 MilliporeSigma, 产品编号为 110580) 进行校正。拟合度达到 99% 时, 方可上机检测, 检测限为 0.01 μg/L。每批样品设置 3 个空白样, 每个样品均平行测定 5 次。结果显示, 各种元素的回收率在 85%~115% 之间, 且样品相对标准偏差 (RSD) 小于 10%, 表明测定结果可信度较高。



注:底图下载自上海市地理信息公共服务平台 (<https://shanghai.tianditu.gov.cn/map/views/standardMap.html>) , 审图号为沪S(2023)061号,下载日期为2024-03-18。

图1 鱼类样本采集断面分布

Fig. 1 Location of sampling sites in the Huangpu River, Suzhou River and Dianshan Lake

表1 用于测定重金属含量的鱼类样本基本信息
Table 1 Basic information of fish samples for heavy metal detection

种类	检测数量/尾		体长/cm		体重/g		食性	水层	
	黄浦江	淀山湖	苏州河	均值	范围	均值			范围
鲢	—	2	—	32.50	30.05~36.20	470.50	423.00~518.50	植食性	中上层
鳊	4	—	3	21.62	11.90~27.00	253.48	30.50~384.40	植食性	中下层
大鳍鱬	6	6	6	7.55	5.60~9.90	12.39	5.40~23.80	杂食性	中上层
刀鲚	6	6	6	20.67	14.40~29.60	30.70	10.20~83.50	肉食性	中下层
光泽黄颡鱼	6	6	6	10.95	10.10~11.60	16.75	12.60~21.70	肉食性	底层
黄颡鱼	6	6	6	106.67	8.40~14.02	59.31	12.70~95.70	肉食性	底层
鲫	6	6	6	15.27	8.30~22.10	152.02	20.30~378.20	杂食性	底层
泥鳅	6	6	6	14.23	10.20~17.10	33.96	9.60~54.40	杂食性	底层
革胡子鲶	2	—	—	50.00	50.00~55.00	1367.65	1305.30~1430.50	肉食性	底层
翘嘴鲌	6	6	6	18.60	13.20~39.00	113.93	22.00~569.40	肉食性	中上层
日本鳊	2	—	2	31.70	29.80~33.60	48.20	42.00~54.40	肉食性	底层
似鳊	6	—	6	11.44	9.40~14.00	25.21	13.20~42.60	杂食性	中上层
乌鳢	6	—	6	26.32	16.20~31.20	319.52	70.00~489.10	肉食性	底层
兴凯鲌	6	—	6	7.82	6.70~11.70	14.50	7.30~33.70	植食性	中上层
鲮	6	6	6	13.03	10.90~15.50	31.87	21.50~56.60	杂食性	中上层

注:“—”表示在该水域单元未采集到样本。

1.4 重金属污染评价标准与方法

1.4.1 鱼体重金属含量限值

本研究中的鱼体 As、Cd、Hg、Cr、Pb 含量限值按《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017) 执行, 分别为 0.1、0.1、0.5、2.0、0.5 mg/kg; Cu 含量限值按《无公害食品 水产品中有毒有害物质限量》(NY 5073—2006) 执行, 为 50 mg/kg; Zn 含量限值参照已往标准及相关研究, 取 50 mg/kg。将大于上述限定值的鱼体肌肉测定数据判定为超标。

1.4.2 单因子污染指数法

采用重金属单因子污染指数法对鱼体重金属污染程度进行评价^[21], 计算公式如下:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中: P_i 为第 i 种重金属的污染指数; C_i 为第 i 种重金属含量检测值的均值, mg/kg; S_i 为第 i 种重金属的含量标准限值, mg/kg。

污染指数评价标准: $P_i \leq 0.2$, 为无污染; $0.2 < P_i \leq 0.6$, 为轻度污染; $0.6 < P_i \leq 1.0$, 为中度污染; $P_i > 1.0$, 为重度污染。

1.4.3 综合污染指数法

环境中的重金属污染通常是复合污染, 因而采用重金属综合污染指数法进行评价^[21], 计算公式如下:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{(P_{i,\text{max}}^2 + P_{i,\text{avg}}^2) / 2} \quad (2)$$

式中: $P_{\text{综}}$ 为综合污染指数, $P_{i,\text{max}}$ 为样品重金属污染指数的最大值, $P_{i,\text{avg}}$ 为样品重金属污染指数的平均值。

重金属综合污染指数评价标准: $P_{\text{综}} \leq 1.0$, 为无污染; $1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$, 为轻度污染; $2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$, 为中度污染; $P_{\text{综}} > 3.0$, 为重度污染。

1.4.4 鱼类食用健康风险评价

采用目标危害系数 (Target Hazard Quotient, THQ) 方法评价食用相关鱼类时的健康风险。THQ 方法假设重金属的摄入量等于吸收剂量, 以人体摄入重金属的剂量与其参考剂量的比值作为评价标准, 可同时评价单一重金属暴露和多种重金属复合暴露的健康风险^[22]。

单一重金属 THQ 计算公式为

$$\text{THQ} = \frac{F_{\text{IR}} \times E_{\text{F}} \times E_{\text{D}} \times C_i}{R_{\text{FD},i} \times W_{\text{AB}} \times T_{\text{A}}} \times 10^{-3} \quad (3)$$

多种重金属复合目标危害系数 (TTHQ) 计算公式为

$$\text{TTHQ} = \sum \text{THQ} \quad (4)$$

式中: THQ 为单一重金属危害系数; TTHQ 为复合重金属危害系数; C_i 为样品重金属含量测定值, mg/kg; F_{IR} 为食物的摄入量, g/d; E_{D} 为暴露时间, 取平均寿命, a; E_{F} 为暴露频率, d/a; R_{FD} 为参考剂量, mg/(kg·d); W_{AB} 为成人的平均体重, kg; T_{A} 为非致癌物的平均暴露时间, 取 $E_{\text{D}} \times 365$ d/a。参考美国国家环境保护局 (U.S. EPA) 研究数据和相关文献^[17-24], 得到 Hg、Pb、Zn、Cr、Cu、Cd、As、Mn 的 R_{FD} 值, 分别为 0.005、0.004、0.300、0.003、0.040、0.001、0.000 4、0.140 mg/(kg·d)。此外, 按照《上海统计年鉴 2021》, 2020 年上海市户籍人口期望寿命为 83.67 岁; 依据文献数据^[25], 上海市人均每日鱼类摄入量为 60 g; 依据《2020 年上海市国民体质监测公报》, 上海市成人标准体重按 65 kg 计。

评价标准如下: THQ ≤ 1 时, 污染物对暴露人群没有明显的健康风险; THQ > 1 时, 存在健康风险, 且 THQ 值越大, 健康风险越大^[19-20]。多种重金属的 TTHQ 等于单一重金属 THQ 之和。

2 结果分析

2.1 不同鱼类的重金属含量

由表 2 可见, 不同重金属元素在鱼类肌肉中的含量不同。Fe 的含量最高 (52.76 mg/kg), 其次为 Zn (22.87 mg/kg), Cd 的含量最低。余下元素中, Cu 的含量平均值为 3.35 mg/kg, Mn 的含量平均值为 1.67 mg/kg, Cr 的含量平均值为 0.24 mg/kg, As 的含量平均值为 0.18 mg/kg, Hg 的含量平均值为 0.14 mg/kg, Pb 的含量平均值为 0.05 mg/kg。与污染物标准限值相比, 鲢、鳊、大鳍鱮、刀鲚、光泽黄颡鱼、黄颡鱼、鲫、日本鳗鲡、翘嘴鲌、似鳊、乌鳢、兴凯鲌和蟹等 13 个物种的 As 含量超标 (> 0.1 mg/kg), 超标样品的数量占比为 76.32%; 其余 8 种元素的含量均未超标。

2.2 鱼体重金属含量的空间差异

由最小显著性差异法 (LSD) 分析结果可见 (表 3), 部分鱼类的 Mn、Pb、As 和 Hg 含量在不同水域间有显著性差异 ($P < 0.05$), Cu、Zn、Cd、Fe 和 Cr 含量在不同水域间无显著性差异。具体来看, 淀山湖黄颡鱼的 Pb、Hg 含量显著高于黄浦江、苏州河, 黄浦江鲫的 Mn 含量显著高于淀山湖

和苏州河,淀山湖泥鳅的 As 和 Hg 含量显著高于黄浦江和苏州河 ($P < 0.05$)。刀鲚、似鳊、大鳍鲮、

光泽黄颡鱼和翘嘴鲌的各种元素含量在不同水域间均无显著差异 ($P > 0.05$)。

表 2 黄浦江水系不同鱼类的重金属含量
Table 2 The contents of 9 heavy metals of different fishes in the Huangpu River system

种类	平均含量								
	Cu	Zn	Pb	Cd	Fe	Cr	Mn	As	Hg
鲢	3.95±0.91	23.92±18.50	nd	nd	21.25±15.50	nd	0.35±0.20	0.20±0.10	0.06±0.04
鳊	2.42±0.86	26.18±19.75	0.02	nd	54.92±38.60	0.64±0.19	3.90±3.17	0.14±0.07	0.06±0.02
大鳍鲮	3.89±1.14	26.17±10.09	0.02	nd	51.97±26.50	0.04±0.03	3.63±3.07	0.34±0.18	0.07±0.03
刀鲚	3.15±1.28	20.72±11.56	0.03±0.02	nd	61.00±51.02	0.18±0.08	2.91±3.17	0.15±0.06	0.19±0.08
光泽黄颡鱼	4.04±1.66	17.18±3.21	0.04±0.04	nd	65.70±50.61	0.31±0.30	0.51±0.37	0.13±0.05	0.23±0.14
黄颡鱼	3.31±1.22	15.39±7.44	0.04±0.07	nd	60.42±54.80	0.14±0.12	0.57±0.31	0.10±0.04	0.13±0.09
鲫	3.54±1.28	27.33±18.66	0.03±0.02	nd	60.09±36.25	0.35±0.35	1.01±1.00	0.15±0.09	0.08±0.04
日本鳊鲌	3.75±1.25	46.45±25.50	0.06	nd	30.70±4.53	0.29±0.15	0.64±0.20	0.13±0.07	0.17±0.12
泥鳅	3.16±0.69	20.45±10.72	0.06±0.04	nd	40.53±20.93	0.17±0.17	0.79±0.72	0.10±0.03	0.08±0.06
革胡子鲶	2.12±0.53	18.47±9.58	nd	nd	15.97±6.55	—	0.65±0.51	0.07±0.05	0.02±0.01
翘嘴鲌	3.01±1.57	21.53±4.17	0.09±0.03	nd	25.93±14.49	0.10±0.10	0.66±0.51	0.30±0.15	0.22±0.16
似鳊	3.36±0.77	34.83±18.43	0.09±0.07	nd	72.63±32.87	0.31±0.28	2.29±1.43	0.19±0.09	0.18±0.15
乌鳢	3.01±2.45	14.68±5.84	0.02±0.01	0.01±0.01	15.10±6.00	0.16±0.08	0.65±0.50	0.15±0.04	0.12±0.04
兴凯鲮	3.99±0.83	20.20±6.12	0.03	nd	73.80±46.41	0.39±0.11	2.88±2.14	0.30±0.16	0.07±0.04
鲮	3.12±0.73	24.95±17.92	0.05±0.01	nd	36.91±21.11	0.31±0.30	1.38±1.22	0.31±0.35	0.19±0.13
平均值	3.35±1.25	22.87±18.54	0.05±0.04	nd	52.76±46.42	0.24±0.20	1.67±1.38	0.18±0.13	0.14±0.10
标准限值	50.00	50.00	0.50	0.10	—	2.00	—	0.10	0.50

注:“nd”表示未检出,“—”表示无标准限值或检测值小于 0.01 mg/kg。

表 3 同种鱼类不同水域间的重金属含量比较
Table 3 Comparison of heavy metal contents in different sections of the same fish

元素	黄颡鱼			鲫			泥鳅		
	黄浦江	淀山湖	苏州河	黄浦江	淀山湖	苏州河	黄浦江	淀山湖	苏州河
Cu	3.55±0.74 ^a	2.11±0.62 ^a	3.36±2.07 ^a	4.19±1.18 ^a	2.37±0.44 ^a	3.35±1.34 ^a	3.14±0.95 ^a	2.55±0.45 ^a	3.25±0.65 ^a
Zn	12.64±6.30 ^a	23.64±2.72 ^a	nd	19.21±8.05 ^a	50.39±35.14 ^a	24.60±13.14 ^a	17.25±6.09 ^a	26.56±13.58 ^a	20.94±12.94 ^a
Pb	0.02±0.01 ^a	0.20 ^b	nd	0.03±0.03 ^a	0.02 ^a	0.05±0.03 ^a	0.01 ^a	nd	0.07±0.04 ^a
Cd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Fe	50.76±24.18 ^a	22.79±0.99 ^a	100.99±145.37 ^a	36.17±10.34 ^a	93.45±80.65 ^a	70.67±21.67 ^a	68.55±51.61 ^a	24.93±11.54 ^a	30.75±12.73 ^a
Cr	0.12±0.08 ^a	0.36 ^a	0.03 ^a	0.09±0.10 ^a	0.04±0.01 ^a	0.62±1.05 ^a	0.04±0.04 ^a	0.02±0.01 ^a	0.25±0.33 ^a
Mn	0.72±0.21 ^a	0.31±0.11 ^a	0.40±0.39 ^a	1.75±1.44 ^a	0.91±0.33 ^{ab}	0.31±0.21 ^b	1.72±1.37 ^a	0.45±0.23 ^a	0.44±0.46 ^a
As	0.09±0.03 ^a	0.15±0.02 ^a	0.09±0.04 ^a	0.11±0.05 ^a	0.23±0.03 ^a	0.17±0.11 ^a	0.10±0.03 ^a	0.16±0.04 ^b	0.09±0.02 ^c
Hg	0.11±0.04 ^{ac}	0.35±0.03 ^b	0.07±0.01 ^c	0.08±0.06 ^a	0.09±0.01 ^a	0.08±0.05 ^a	0.10±0.02 ^a	0.23±0.05 ^b	0.05±0.04 ^c

注:不同水域同种鱼类的某一重金属的含量间具有不同的上标字母,表示两者具有显著性差异 ($P < 0.05$);“nd”表示未检出。

2.3 鱼体重金属含量的食性差异

整体来看,不同食性鱼类的体内重金属含量具有不同的变化趋势。Cu、Zn、Pb、Cd、Fe、Cr 等 6 种元素在不同食性鱼类间无显著性差异 (ANOVA, $P > 0.05$),而 Mn、As、Hg 在不同食性鱼类间则有极显著性差异 ($P < 0.01$)。其中, Mn 含量排序为植食性>肉食性>杂食性, As 为植食性>杂食性>肉食性, Hg 为肉食性>杂食性>植食性。不同断面间的比较结果见表 4。在黄浦江水域, Zn、Hg 在肉食性和植食性鱼类间差异显著 ($P <$

0.05),植食性鱼类的 Zn 含量显著高于肉食性鱼类,但 Hg 含量则显著低于肉食性鱼类。在淀山湖水域, Cu 和 Zn 在不同食性鱼类间差异显著 ($P < 0.05$),植食性鱼类的 Cu 含量最高, Zn 则是杂食性>植食性>肉食性。在苏州河水域, Mn、As、Hg 在不同食性鱼类间差异显著 ($P < 0.05$), Mn、As 含量表现为植食性>肉食性>杂食性, Hg 则是肉食性>杂食性>植食性。余下元素在同一断面内的不同食性鱼类间无显著性差异 ($P > 0.05$)。

表4 不同食性鱼类重金属含量比较

Table 4 Comparison of heavy metal contents in different feeding fishes

mg/kg

元素	黄浦江			淀山湖			苏州河		
	肉食性	杂食性	植食性	肉食性	杂食性	植食性	肉食性	杂食性	植食性
Cu	3.57±1.36 ^a	3.63±0.97 ^a	3.81±1.15 ^a	2.05±0.73 ^a	2.42±0.27 ^{ab}	3.46±0.7 ^b	3.22±1.67 ^a	3.27±0.85 ^a	3.27±1.22 ^a
Zn	16.16±5.61 ^a	20.47±6.62 ^{ab}	24.26±12.49 ^b	19.99±4.55 ^a	46.5±24.57 ^b	27.87±5.58 ^c	24.9±15.82 ^a	26.41±32.68 ^a	22.18±8.65 ^a
Pb	0.03±0.02 ^a	0.03±0.02 ^a	0.02 ^a	0.10±0.14 ^a	0.02 ^a	nd	0.04±0.03 ^a	0.07±0.05 ^a	0.02±0.01 ^a
Cd	0.01±0.01 ^a	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Fe	48.75±36.53 ^a	54.54±29.59 ^a	60.53±52.43 ^a	22.84±11.46 ^a	57.27±62.63 ^a	27.05±8.21 ^a	61.58±78.38 ^a	52.35±31.70 ^a	61.87±46.80 ^a
Cr	0.08±0.08 ^a	0.09±0.09 ^a	0.35±0.83 ^a	0.21±0.21 ^a	0.03±0.01 ^a	0.01 ^a	0.34±0.35 ^a	0.43±0.63 ^a	0.29±0.62 ^a
Mn	1.72±2.42 ^a	2.24±1.50 ^a	2.11±0.77 ^a	0.43±0.28 ^a	0.74±0.29 ^a	1.22±1.23 ^a	0.95±1.67 ^{ab}	0.69±0.55 ^b	5.33±5.56 ^c
As	0.13±0.08 ^a	0.14±0.09 ^a	0.19±0.10 ^a	0.19±0.08 ^a	0.41±0.42 ^a	0.29±0.13 ^a	0.16±0.11 ^{ab}	0.14±0.07 ^b	0.37±0.19 ^c
Hg	0.14±0.08 ^a	0.11±0.11 ^{ab}	0.07±0.02 ^b	0.23±0.10 ^a	0.14±0.07 ^a	0.09±0.04 ^a	0.21±0.13 ^a	0.13±0.12 ^{ab}	0.06±0.04 ^b

注:同一水域不同食性鱼类的某一重金属的含量间具有不同的上标字母,表示两者具有显著性差异($P < 0.05$);“nd”表示未检出。

2.4 重金属污染评价

仅 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、As 和 Hg 等 7 种元素有食品国家标准或行业标准限值,可进行污染状况分析。依据公式(1)和公式(2)计算 3 个水域鱼类样本的 P_i 和 $P_{综}$,结果见表 5。Cr、Pb、Cu 和 Cd 为无污染状态($P_i < 0.2$),Zn、Hg 为轻度污染状态($0.6 <$

$P_i \leq 1.0$),As 为重度污染状态($P_i > 1.0$),整体为轻度污染状态($P_{综}$ 均值为 1.511)。具体到物种,革胡子鲶、黄颡鱼、泥鳅、日本鳗鲡、光泽黄颡鱼为无污染($P_{综} \leq 1.0$),鳊、乌鳢、刀鲚、鲫、似鳊、鲢为轻度污染($1.0 < P_{综} \leq 2.0$),兴凯鲮、翘嘴鲌、大鳍鲮为中度污染($2.0 < P_{综} \leq 3.0$),蟹为重度污染($P_{综} > 3.0$)。

表5 黄浦江水系鱼类重金属的单因子污染指数和综合污染指数

Table 5 Single pollution index and comprehensive pollution index of heavy metals of fish in the Huangpu River system

鱼类	黄浦江 P_i							黄浦江 $P_{综}$
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	As	Hg	
光泽黄颡鱼	0.076	0.362	—	—	0.088	1.295	0.401	0.968
刀鲚	0.070	0.346	0.064	—	0.022	1.557	0.340	1.137
似鳊	0.071	0.432	0.071	—	0.045	1.947	0.325	1.418
翘嘴鲌	0.062	0.420	—	—	0.010	2.236	0.255	1.636
黄颡鱼	0.071	0.253	0.033	—	0.058	0.934	0.221	0.686
泥鳅	0.063	0.345	0.022	—	0.021	1.017	0.205	0.745
乌鳢	0.079	0.329	0.052	0.122	0.051	1.475	0.195	1.069
蟹	0.064	0.510	—	—	0.095	1.567	0.167	1.159
大鳍鲮	0.084	0.451	0.033	0.092	0.028	2.374	0.161	1.710
日本鳗鲡	0.093	—	0.102	—	0.019	0.772	0.154	0.569
鲫	0.084	0.384	0.056	—	0.045	1.052	0.152	0.773
兴凯鲮	0.084	0.476	—	—	0.033	2.047	0.152	1.500
鳊	0.058	0.524	0.042	—	0.415	1.173	0.104	0.873
革胡子鲶	0.042	0.369	—	—	0.002	0.732	0.041	0.544
鲢	—	—	—	—	—	—	—	—
鱼类	淀山湖 P_i							淀山湖 $P_{综}$
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	As	Hg	
光泽黄颡鱼	0.051	0.308	—	—	—	1.371	0.174	1.026
刀鲚	0.043	0.396	—	0.012	0.034	1.938	0.373	1.409
似鳊	—	—	—	—	—	—	—	—
翘嘴鲌	0.025	0.353	—	—	—	3.309	0.435	2.451
黄颡鱼	0.042	0.473	0.408	0.024	0.181	1.468	0.692	1.090
泥鳅	0.051	0.531	—	0.004	0.008	1.623	0.466	1.190
乌鳢	—	—	—	—	—	—	—	—
蟹	0.048	1.173	—	0.006	0.017	10.376	0.282	7.470
大鳍鲮	0.059	0.636	—	—	0.004	3.785	0.233	2.758
日本鳗鲡	—	—	—	—	—	—	—	—
鲫	0.047	1.008	0.046	0.009	0.022	2.291	0.171	1.660
兴凯鲮	—	—	—	—	—	—	—	—
鳊	—	—	—	—	—	—	—	—
革胡子鲶	—	—	—	—	—	—	—	—
鲢	0.079	0.478	—	—	—	1.995	0.125	1.488

续表

鱼类	苏州河 P_i							苏州河 $P_{\text{综}}$
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	As	Hg	
光泽黄颡鱼	0.098	—	0.076	0.026	0.243	1.286	0.637	0.951
刀鲚	0.059	0.532	0.073	0.039	0.195	1.362	0.463	1.002
似鳊	0.063	0.961	0.197	0.020	0.239	1.774	0.391	1.308
翘嘴鲌	0.070	0.474	0.182	0.034	0.092	3.575	0.608	2.579
黄颡鱼	0.067	—	—	0.020	0.013	0.937	0.133	0.683
泥鳅	0.065	0.419	0.134	0.020	0.124	0.852	0.105	0.627
乌鳢	0.022	0.222	0.034	0.012	0.126	1.515	0.286	1.094
鲈	0.066	0.267	0.110	0.038	0.245	1.790	0.573	1.304
大鳍鱮	0.076	0.539	0.041	0.023	0.020	4.663	0.081	3.343
日本鳗鲡	0.057	0.929	0.123	0.018	0.269	1.811	0.507	1.334
鲫	0.067	0.492	0.095	0.033	0.309	1.664	0.167	1.211
兴凯鲮	0.076	0.380	0.064	0.071	0.307	3.902	0.130	2.816
鳊	0.034	—	—	0.013	0.027	1.735	0.131	1.257
革胡子鲶	—	—	—	—	—	—	—	—
鲢	—	—	—	—	—	—	—	—

注:“—”表示污染指数小于0.001。

在黄浦江水域,Cu、Pb、Cd在各种鱼类中均为无污染,Zn均为轻度污染,Cr仅在鳊中为轻度污染,Hg在光泽黄颡鱼、刀鲚、似鳊、翘嘴鲌、黄颡鱼中为轻度污染,As在光泽黄颡鱼、刀鲚、翘嘴鲌等11种鱼类中为重度污染。 $P_{\text{综}}$ 显示,刀鲚、似鳊、翘嘴鲌、乌鳢、鲈、大鳍鱮和兴凯鲮等7种鱼类为轻度污染($1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$),其他鱼类均为无污染($P_{\text{综}} \leq 1.0$)。

在淀山湖水域,As在所有物种中均为重度污染($P_{\text{综}} > 3.0$),Cu、Cd、Cr为无污染,Zn、Pb、Hg在不同物种中呈轻度~中度污染,Zn在鲈、鲫中为重度污染。从 $P_{\text{综}}$ 来看,所有物种都呈污染状态。其中,黄颡鱼、泥鳅、刀鲚、光泽黄颡鱼、鲫、鲢为轻度污染,翘嘴鲌、大鳍鱮为中度污染($2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$),鲈为重度污染($P_{\text{综}} > 3.0$),中度及重度污染物个体数量占比为33.33%。

在苏州河水域,Cu、Pb、Cd在各种鱼类中均为

无污染;Zn在各种鱼类中均为轻度污染;Cr在光泽黄颡鱼等6种鱼类中为轻度污染;As在光泽黄颡鱼等11种鱼类中为重度污染,在泥鳅和黄颡鱼中为中度污染;Hg在光泽黄颡鱼等7种鱼类中为轻度~中度污染。从 $P_{\text{综}}$ 来看,光泽黄颡鱼、黄颡鱼和泥鳅为无污染,鲈、日本鳗鲡、刀鲚、似鳊、乌鳢、鲫和鳊为轻度污染,翘嘴鲌、兴凯鲮为中度污染,大鳍鱮为重度污染,中度及重度污染物种占23.08%。

2.5 健康风险评价

按公式(3)和公式(4)计算得到的当地人群通过食用鱼类摄入重金属的THQ值和TTHQ值见表6。所有鱼类样本的重金属THQ均值排序为 $As > Hg > Zn > Cu > Cr > Pb = Mn > Cd$ 。在各水域中,THQ均值以As为最大,Cd为最小。在所有样本中,仅5.56%的样本的As元素THQ值大于1,其他元素的THQ值均小于1。这说明除了As元素,单一重金属元素对当地人群无健康风险。

表6 不同重金属元素的人体摄入风险评价

Table 6 Risk assessment of different heavy metals on human

元素	黄浦江 THQ 平均值	苏州河 THQ 平均值	淀山湖 THQ 平均值	THQ>1 样本比例/%
Cu	0.083±0.015	0.073±0.022	0.057±0.017	0.00
Zn	0.057±0.020	0.062±0.048	0.092±0.046	0.00
Pb	0.000	0.010±0.007	0.010±0.016	0.00
Cd	0.003±0.003	0.003±0.001	0.001±0.001	0.00
Cr	0.041±0.064	0.105±0.067	0.018±0.036	0.00
As	0.333±0.125	0.477±0.276	0.722±0.655	5.56
Hg	0.189±0.089	0.299±0.196	0.303±0.168	0.00
Mn	0.011±0.006	0.012±0.014	0.004±0.004	0.00

每种鱼类在不同水域的THQ值和TTHQ值也有一定差异。由表7可见,黄浦江无THQ值大于1的鱼类,苏州河仅大鳍鱮中的As的THQ值大于1,

淀山湖仅鲈中的As的THQ值大于1。黄浦江似鳊的TTHQ值接近1;苏州河光泽黄颡鱼、刀鲚、似鳊、翘嘴鲌、鲈、大鳍鱮、日本鳗鲡、兴凯鲮的TTHQ值均

大于1;淀山湖泥鳅的TTHQ值接近1,翘嘴鲌、黄颡鱼、鲈、大鳍鲯的TTHQ值大于1。以上鱼类均存在复合重金属健康风险。计算获得的黄浦江、苏州河、

淀山湖TTHQ均值分别为0.721、1.040、1.259。可见,淀山湖和苏州河水域鱼类均存在复合重金属健康风险,黄浦江鱼类的复合重金属健康风险较低。

表7 不同水域同种鱼类的单一和复合重金属摄入健康风险

Table 7 Health risks of single and compound heavy metals intake of the same fish in different sections

鱼类	黄浦江 THQ								黄浦江 TTHQ
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	As	Hg	Mn	
光泽黄颡鱼	0.088	0.056	—	0.001	0.054	0.299	0.371	0.005	0.873
刀鲚	0.081	0.053	0.007	0.003	0.014	0.359	0.314	0.026	0.857
似鳊	0.081	0.067	0.008	0.004	0.028	0.449	0.300	0.020	0.957
翘嘴鲌	0.072	0.065	—	0.002	0.006	0.516	0.235	0.006	0.902
黄颡	0.082	0.039	0.004	0.002	0.036	0.215	0.204	0.005	0.587
泥鳅	0.072	0.053	0.003	0.002	0.013	0.235	0.189	0.011	0.578
乌鳢	0.092	0.051	0.006	0.011	0.031	0.340	0.180	0.005	0.716
鲈	0.074	0.078	—	0.003	0.058	0.362	0.154	0.015	0.744
大鳍鲯	0.097	0.069	0.004	0.008	0.017	0.548	0.149	0.016	0.908
日本鳊	0.107	—	0.012	—	0.011	0.178	0.142	0.005	0.455
鲫	0.097	0.059	0.006	0.001	0.028	0.243	0.140	0.012	0.585
兴凯鲮	0.097	0.073	—	0.002	0.020	0.472	0.140	0.012	0.817
鳊	0.067	0.081	0.005	0.001	0.256	0.271	0.096	0.013	0.789
革胡子鲶	0.049	0.057	—	—	0.001	0.169	0.038	0.004	0.318
鲢	—	—	—	—	—	—	—	—	—
超标率/%	0	0	0	0	0	0	0	0	7.10
鱼类	苏州河 THQ								苏州河 TTHQ
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	As	Hg	Mn	
光泽黄颡鱼	0.113	—	0.009	0.002	0.149	0.297	0.588	0.002	1.159
刀鲚	0.068	0.082	0.008	0.004	0.120	0.314	0.428	0.014	1.037
似鳊	0.073	0.148	0.023	0.002	0.147	0.409	0.361	0.009	1.172
翘嘴鲌	0.081	0.073	0.021	0.003	0.056	0.825	0.561	0.003	1.624
黄颡	0.078	—	—	0.002	0.008	0.216	0.123	0.003	0.429
泥鳅	0.075	0.064	0.015	0.002	0.077	0.197	0.097	0.003	0.530
乌鳢	0.025	0.034	0.004	0.001	0.077	0.350	0.264	0.001	0.756
鲈	0.076	0.041	0.013	0.004	0.151	0.413	0.529	0.007	1.234
大鳍鲯	0.088	0.083	0.005	0.002	0.012	1.076	0.075	0.038	1.379
日本鳊	0.066	0.143	0.014	0.002	0.166	0.418	0.468	0.004	1.280
鲫	0.077	0.076	0.011	0.003	0.190	0.384	0.154	0.002	0.897
兴凯鲮	0.087	0.058	0.007	0.007	0.189	0.905	0.120	0.026	1.398
鳊	0.039	—	—	0.001	0.016	0.400	0.121	0.045	0.623
革胡子鲶	—	—	—	—	—	—	—	—	—
鲢	—	—	—	—	—	—	—	—	—
超标率/%	0	0	0	0	0	7.70	0	0	61.50
鱼类	淀山湖 THQ								淀山湖 TTHQ
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	As	Hg	Mn	
光泽黄颡鱼	0.058	0.047	—	—	—	0.316	0.160	0.002	0.584
刀鲚	0.049	0.061	0	0.001	0.021	0.447	0.344	0.005	0.929
似鳊	—	—	—	—	—	—	—	—	—
翘嘴鲌	0.028	0.054	—	—	—	0.764	0.402	0.001	1.250
黄颡	0.049	0.073	0.047	0.002	0.111	0.339	0.638	0.002	1.262
泥鳅	0.059	0.082	—	—	—	0.005	0.374	0.003	0.954
乌鳢	—	—	—	—	—	—	—	—	—
鲈	0.055	0.181	—	0.001	0.010	2.394	0.260	0.005	2.905
大鳍鲯	0.068	0.098	—	—	—	0.002	0.874	0.014	1.271
日本鳊	—	—	—	—	—	—	—	—	—
鲫	0.055	0.155	0.005	0.001	0.014	0.529	0.157	0.006	0.922
兴凯鲮	—	—	—	—	—	—	—	—	—
鳊	—	—	—	—	—	—	—	—	—
革胡子鲶	—	—	—	—	—	—	—	—	—
鲢	0.091	0.074	—	—	—	0.460	0.116	0.002	0.743
超标率/%	0	0	0	0	0	11.10	0	0	44.44

注:“—”表示健康风险系数小于0.001。

3 讨论

3.1 黄浦江水系鱼体重金属含量水平

本研究分析了黄浦江水系鱼类肌肉组织的食用安全性,结果表明,在所有鱼类肌肉样本中,除 As 外,其他重金属的含量均低于国家标准或行业标准限值。与其他水域的同类研究^[21,26-37]相比(表 8),黄浦江水系 Cu 含量与长江、草海、珠江三角洲河网、钱塘江和洞庭湖等研究水域接近,明显低于 Danube 河等国外河流;Zn 含量则明显高于钱塘江、珠江三角洲河网、洞庭湖和东江等研究水域,与长江上游较接近,低于国外河流;Pb 含量则显著低于

长江、珠江三角洲河网、洞庭湖和太湖等主要研究水域,与钱塘江、东江和松花江较接近;Cd 含量显著低于太湖、洞庭湖和草海等湖泊,与长江、松花江和钱塘江研究水域较接近;Fe 含量高于洞庭湖和珠江三角洲河网水域;Cr 含量与长江、太湖、松花江和东江研究水域接近,显著低于洞庭湖和珠江三角洲河网;Mn 含量与国内水域接近,显著低于国外河流;As 含量与长江江苏段、草海、珠江三角洲河网、洞庭湖等研究水域较接近,高于长江上游、钱塘江和松花江水域;仅 Hg 的含量明显高于国内其他水域。由此表明,黄浦江水系鱼体中 As 和 Hg 的含量高于国内大部分研究水域,As 和 Hg 是引起黄浦江水系鱼体重金属污染的主要元素。

表 8 不同研究水域鱼体重金属含量比较

Table 8 Comparison of heavy metal contents in fish from different research waters

研究水域	Cu	Zn	Pb	Cd	Fe	Cr	Mn	As	Hg	文献
长江宜宾至湖口段	0.36~18.76	0.79~50.80	0.01~3.80	0.00~0.97	—	0.00~0.81	—	—	0.00~0.05	[26]
长江江苏段	—	—	0.21	0.00	—	0.27	—	0.29	0.08	[27]
草海	1.50	57.24	0.33	0.08	—	0.77	—	0.21	0.09	[28]
钱塘江闻堰至建德段	1.45	7.35	0.03	0.01	—	—	—	0.03	0.03	[29]
珠江三角洲河网区	3.48	7.08	0.57	0.01	7.21	2.25	0.77	0.32	0.00	[30]
洞庭湖	3.37	6.38	0.45	0.15	5.19	1.25	—	0.34	0.02	[31]
长江巴南至宜宾段	0.39~1.17	29.83~38.68	0.03~0.64	0.02~0.04	—	—	—	0.03~0.08	0.02~0.07	[32]
太湖	0.21	—	0.61	0.12	—	0.34	—	—	—	[33]
松花江松林至佳木斯段	—	—	0.05	0.00	—	0.08	—	0.09	0.08	[34]
东江惠州段	0.19	5.54	0.07	—	—	0.05	0.67	—	0.02	[21]
孟加拉国 Buriganga 河	0.98	25.18	—	—	—	—	—	—	—	[35]
塞尔维亚 Danube 河	4.80	—	9.96	—	—	6.28	—	—	—	[36]
孟加拉国 Bangshi 河	22.80	168.97	4.64	0.30	—	1.12	23.77	3.55	—	[37]
黄浦江	3.63±1.21	18.57±7.42	0.03±0.02	0.01	52.41±37.70	0.13±0.35	1.93±1.97	0.15±0.09	0.12±0.09	本研究
苏州河	3.25±1.28	25.35±25.73	0.05±0.04	0.00	57.82±56.76	0.37±0.53	1.62±3.03	0.19±0.14	0.16±0.13	本研究
淀山湖	2.41±0.76	30.14±18.20	0.08±0.11	0.00	35.02±37.52	0.09±0.14	0.67±0.53	0.28±0.25	0.17±0.10	本研究

注:“—”表示文献中未标明。

陶征楷等^[38]研究了上海市河网沉积物中 As 的污染指数,发现有 15 个样点为中度污染,提出应时刻保持警惕、定时开展监测,采取措施维持河流 As 健康水平。张翠等^[39]指出,上海市饮用水水源地水体中,Hg 污染最严重,85.6%的样点超过Ⅲ类标准限值,不符合饮用水水源地水质标准;表层沉积物中,62.5%的样点超过上海市 Hg 元素土壤背景值。水体及表层沉积物中较高的 As、Hg 含量可能是导致部分鱼类体内两种元素的含量超标的重要原因。污染指数分析结果也表明,As 是黄浦江、苏州河和淀山湖水域的主要污染元素,翘嘴鲌、大鳍鲌和鲈为主要受污染物种。

重金属在鱼体内的富集特征与物种类别及鱼体组织类型有关。不同鱼类的栖息环境、食性、代谢活性等都存在差异,导致重金属在鱼体内的富

集程度也有较大差异^[21,31,40]。有研究认为,肉食性鱼类体内的重金属含量高于杂食性和植食性鱼类^[34,41]。在本研究中,仅 Hg 的分布特征符合这一研究结论。例如:在黄浦江水域,植食性鱼类的 Zn 含量显著高于肉食性鱼类;在淀山湖水域,植食性鱼类的 Cu 含量最高,Zn 则是杂食性>植食性>肉食性;在苏州河水域,Mn、As 的含量表现为植食性>肉食性>杂食性。此外,Cu、Fe、Cr、Mn、As 等元素在多数水域表现为植食性>杂食性>肉食性。也有部分研究指出,Mn、As 和 Cr 等元素并非在肉食性鱼类中的含量最高,其含量特征还与不同重金属在食物链中的生物富集情况有关^[41]。重金属可在水、沉积物等介质中迁移,以液相和沉积物相存在,其中液相中的重金属主要被悬浮物吸附,仅少量溶解在水里^[42]。本研究分析的鲢、

鳊和兴凯鲮等植食性鱼类^[43]可能是在食用藻类等食物的过程中摄入了较多的重金属,从而造成较高的肌肉重金属含量。

本研究同时包含了2013年(S1~S2断面)和2020年(S6~S7断面)采自黄浦江上游的鱼类样本,对其进行方差分析显示,有4种元素的含量在两个时间段之间有显著差异($P < 0.05$),其中2013年样本的Cu、Fe、Mn含量显著高于2020年样本,As含量相反,其余元素则无显著性差异($P > 0.05$)。各采样断面的综合水质在Ⅱ~Ⅳ类之间。对鱼体内的重金属元素含量与采样断面的水质等级进行相关性分析(Pearson)显示,Cu元素含量与水质等级呈极显著负相关($r = -0.722$, $P < 0.01$),Zn、As元素呈显著正相关($r = 0.445$, 0.367 , $P < 0.05$),其余元素无显著相关性。这可能是由于水质等级是根据水体所含溶解氧、金属元素、微生物、化学物质等多项指标测算得到的,而本研究测定的重金属含量只是其中的部分指标,并且经过了鱼体代谢。

3.2 黄浦江水系鱼体重金属污染的变化趋势

夏福兴等^[44]在1988年研究了黄浦江上游江段沉积物中重金属的污染情况,发现中污染和重污染的样点总计占52%,沉积物中重金属的含量在20世纪60—80年代不断升高。项凌云等^[45]总结了1984—2009年黄浦江沉积物中重金属的污染趋势,结果表明,黄浦江沉积物中,除Pb含量略呈上升趋势外,Cu、Zn、Cd、As的含量均呈先升高后回落的趋势。杨涛等^[46]的研究表明,2013—2015年黄浦江沉积物Cu、Pb、Zn、Cd含量已低于黄浦江背景值,重金属污染呈降低趋势。以上研究表明,经过多年内河整治、排污控制和底泥疏浚,黄浦江沉积物重金属污染状况得到持续改善。有关黄浦江鱼类重金属污染的研究较少。李佳凡^[47]报道了2017—2018年在黄浦江干流采集的7种常见鱼类肌肉中的重金属含量,结果显示,鱼体中的Zn(14.581~94.531 mg/kg)、Cr(1.651~41.796 mg/kg)、Cu(2.851~11.491 mg/kg)、Ni(0.725~3.296 mg/kg)、As(0.151~16.031 mg/kg)、Pb(0.223~0.409 mg/kg)、Cd(0.002~0.011 mg/kg)含量大都低于国家标准限值,仅As和Cr在部分样品中存在超标。本研究采集的15种鱼类样本中,仅As存在超标,超标率为76.32%,尤其是2020年鱼类样本中的As的含量显著高于2013年,表明As仍是造成黄浦江水

系鱼类重金属污染的主要元素,应予以警惕并定期开展监测。

3.3 食鱼人群的健康风险分析

复合重金属健康风险分析结果显示,黄浦江、苏州河、淀山湖水域鱼类的TTHQ均值分别为0.721、1.040、1.259,淀山湖和苏州河水域鱼类均存在复合重金属健康风险,黄浦江水域鱼类的复合重金属健康风险则较低。目前,虽然黄浦江和苏州河水域仅在上游河段有零星的捕捞作业,渔业产量相对较低,但食用野生鱼类的人群相对集中且固定。因此,长期食用这些鱼类引起的健康风险应引起注意。淀山湖是上海市重要的渔业水域,每年春季禁渔期过后,会有专业渔民密集开展捕捞作业,当地群众也有喜食野生鱼类的习惯。这一水域所有鱼类的 $P_{\text{综}}$ 都呈污染状态,TTHQ均值也存在健康风险。对于专业渔民及周边鱼类消耗量较大的居民,当每日摄入量达到100 g($F_{\text{IR}} = 100 \text{ g/d}$)时,绝大多数鱼类的TTHQ值将大于1(范围为0.973~4.841,平均2.003),会产生较高的健康风险^[25]。因此,对这部分居民应作重点关注,并进行深入的复合重金属健康风险评价。

4 结论

本文测定了黄浦江水系15种常见鱼类的重金属含量,发现黄颡鱼、刀鲚、似鳊、翘嘴鲌、餐、大鳍鲮、日本鳗鲡等均受到重金属As污染,有潜在食用健康风险。根据推算,成年人平均每日食用淀山湖、苏州河鱼类不宜超过100 g。应重点关注渔民及周边居民的重金属健康风险。

参考文献(References):

- [1] GOPALANI M, SHAHARE M, RAMTEKE D S, et al. Heavy Metal Content of Potato Chips and Biscuits from Nagpur City, India [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2007, 79: 384-387.
- [2] THOMAS L D K, HODGSON S, NIEUWENHUIJSEN M, et al. Early Kidney Damage in a Population Exposed to Cadmium and Other Heavy Metals [J]. Environmental Health Perspectives, 2009, 117: 181-184.
- [3] 陈家长, 张瑞涛, 胡庚东. 鱼类“致癌、致畸、致突变”测试技术在渔业环境监测中的应用 [J]. 中国水产科学, 1999(1): 94-97.

- CHEN Jiachang, ZHANG Ruitao, HU Gengdong. Application of Analytical Technique for Fish Canceration, Malformation and Mutation in Fisheries Environmental Monitoring [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 1999(1):94-97.
- [4] ARTS M T, ACKMAN R G, HOLUB B J. “Essential Fatty Acids” in Aquatic Ecosystems; A Crucial Link Between Diet and Human Health and Evolution [J]. Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences, 2001, 58(1):122-137.
- [5] LIU J, XU X, YU S, et al. Mercury Pollution in Fish from South China Sea: Levels, Species-Specific Accumulation, and Possible Sources [J]. Environmental Research, 2014, 131(5):160-164.
- [6] ZHAO S, FENG C, QUAN W, et al. Role of Living Environments in the Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Fishes and Crabs in the Yangtze River Estuary, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2012, 64(6):1 163-1 171.
- [7] 沈军, 王东启, 史贵涛, 等. 黄浦江水源地水和沉积物中汞的分布 [J]. 环境科学研究, 2008, 21(2):24-28.
- SHEN Jun, WANG Dongqi, SHI Guitao, et al. The Distribution of Mercury in the Water and Sediment at Huangpu River Water Source Area [J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(2):24-28.
- [8] 刘靳, 涂耀仁, 蒲雅丽, 等. 重金属在黄浦江流域的污染现状与来源解析 [J]. 环境科技, 2019, 32(6):1-7.
- LIU Jin, TU Yaoren, PU Yali, et al. Pollution Status and Source Analysis of Heavy Metals in Huangpu River Basin [J]. Environmental Science and Technology, 2019, 32(6):1-7.
- [9] 郑玲芳. 黄浦江上游底栖动物与沉积物重金属潜在生态风险 [J]. 安全与环境学报, 2014, 14(2):230-234.
- ZHENG Lingfang. Investigation of Macroinvertebrates and the Potential Ecological Risks of Heavy-Metal Contaminants in the Riverbed Sediments in the Upstream Huangpu River [J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(2):230-234.
- [10] 李佳凡, 姚竞芳, 顾佳媛, 等. 黄浦江铅的人体健康水质基准研究 [J]. 环境科学学报, 2018, 38(12):4 840-4 847.
- LI Jiafan, YAO Jingfang, GU Jiayuan, et al. Human Health Based Water Quality Criteria of Lead in Huangpu River [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(12):4 840-4 847.
- [11] 陶洁. 淀山湖小型鱼类群落结构及优势种的生物学研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.
- [12] 韩婵, 高春霞, 田思泉, 等. 淀山湖鱼类群落结构多样性的年际变化 [J]. 上海海洋大学学报, 2014, 23(3):403-410.
- HAN Chan, GAO Chunxia, TIAN Siquan, et al. Analysis of Annual Variations for Fish Community Structure in Dianshan Lake [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2014, 23(3):403-410.
- [13] 孙菁煜, 戴小杰, 朱江峰, 等. 淀山湖鱼类多样性分析 [J]. 上海海洋大学学报, 2007, 16(5):454-459.
- SUN Jingyu, DAI Xiaojie, ZHU Jiangfeng, et al. Analysis of the Fish Species Diversity in Dianshan Lake [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2007, 16(5):454-459.
- [14] 邵严, 唐文乔, 龚珑, 等. 上海淀山湖及黄浦江上游鱼类物种多样性及群落结构分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(7):1 482-1 493.
- SHAO Yan, TANG Wenqiao, GONG Long, et al. Analysis of the Fish Species Diversity and Assemblage of the Dianshan Lake and Upper Reaches of the Huangpu River in Shanghai [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(7):1 482-1 493.
- [15] 余宏昌, 毕宝帅, 唐文乔, 等. 上海苏州河治理中鱼类多样性及群落结构变化 [J]. 生物多样性, 2021, 29(1):32-42.
- YU Hongchang, BI Baoshuai, TANG Wenqiao, et al. Changes in Fish Diversity and Assemblage During Comprehensive Restoration of the Suzhou River in Shanghai [J]. Biodiversity Science, 2021, 29(1):32-42.
- [16] 陈小华, 李小平, 程曦, 等. 黄浦江和苏州河上游鱼类多样性组成的时空特征 [J]. 生物多样性, 2008, 16(2):191-196.
- CHEN Xiaohua, LI Xiaoping, CHENG Xi, et al. Spatial-Temporal Distribution of Fish Assemblages in the Upstreams of Huangpu River and Suzhou Creek [J]. Biodiversity Science, 2008, 16(2):191-196.
- [17] 王小冬, 朱浩, 顾兆俊, 等. 黄浦江上游水域土著鱼类组成及体重与可量性状关系研究 [J]. 渔业现代化, 2014(3):43-47.
- WANG Xiaodong, ZHU Hao, GU Zhaojun, et al. Community Composition and the Relationship Between Measurable Characters and Total Weight for the Native Fishes from Upper Rivers of Huangpu River Area [J]. Fishery Modernization, 2014(3):43-47.

- [18] 洪波,孙振中,张玉平,等.黄浦江上游渔业资源增殖放流效果评价[J].水产科技情报,2009,36(4):178-181.
HONG Bo, SUN Zhenzhong, ZHANG Yuping, et al. Evaluation on the Effect of Fishery Resources Proliferation and Release in the Upper Reaches of Huangpu River[J]. Fisheries Science & Technology Information, 2009, 36(4):178-181.
- [19] 魏布.黄浦江上游支流——圆泄泾鱼类资源和水质特征研究[D].上海:上海海洋大学,2019.
- [20] 夏建宏,陆剑锋,周保春,等.上海苏州河鱼类群落的初步研究[J].湖泊科学,2009,21(4):538-546.
XIA Jianhong, LU Jianfeng, ZHOU Baochun, et al. A Preliminary Study on Fish Communities in Suzhou Creek, Shanghai[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(4):538-546.
- [21] 王丽,陈凡,马千里,等.东江惠州段鱼类重金属污染及健康风险评价[J].生态与农村环境学报,2017,33(1):70-76.
WANG Li, CHEN Fan, MA Qianli, et al. Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Fish in Huizhou Section of the Dongjiang River[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2017, 33(1):70-76.
- [22] U.S. EPA. Risk-Based Concentration Table [R]. Washington DC:U.S. EPA,2000.
- [23] 高志杰,汪娜娜,姚浔平,等.海产品中重金属铅、汞、镉、铬对人体健康的潜在风险评价[J].中国卫生检验杂志,2014,24(7):1 019-1 021,1 025.
GAO Zhijie, WANG Lina, YAO Xunping, et al. Potential Health Risk of Lead, Mercury, Cadmium and Chromium in Seafoods[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2014, 24(7):1 019-1 021, 1 025.
- [24] Office of Water, United States Environmental Protection Agency. Guidance for Assessing Chemical Contaminant Data for Use in Fish Advisories—Volume 2: Risk Assessment and Fish Consumption Limits, Third Edition; EPA 823-B-00-008[S]. United States Environmental Protection Agency, 2000.
- [25] 李干琼,高利伟,许世卫,等.上海水产业发展状况与供需预测研究[J].中国渔业经济,2021,39(3):42-49.
LI Ganqiong, GAO Liwei, XU Shiwei, et al. Research on the Development Status of Shanghai Aquaculture Industry and Its Supply and Demand Forecast[J]. Chinese Fisheries Economics, 2021, 39(3):42-49.
- [26] 陶征楷,毕春娟,陈振楼,等.上海市河网水体中 As 的分布特征及其生态风险评价[J].生态毒理学报,2013,8(2):268-274.
TAO Zhengkai, BI Chunjuan, CHEN Zhenlou, et al. Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of As in Waters of Shanghai River Network[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2013, 8(2):268-274.
- [27] 张翠.上海饮用水源地 Hg、As 等重金属的分布特征及其风险评价[D].上海:华东师范大学,2008.
- [28] 王文君,易雨君,张尚弘,等.长江中下游鱼类重金属污染及健康风险评价[J].水利水电技术,2019,50(2):8-13.
WANG Wenjun, YI Yujun, ZHANG Shanghong, et al. Study on Heavy Metals Pollution and Health Risk Assessment Among Different Species of Fish over the Middle and Lower Reaches of Yangtze River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(2):8-13.
- [29] 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 Sulan, HU Guanjiu, LI Yiqiang, et al. Heavy Metal Content Pollution Investigation and Evaluation of Organisms in Jiangsu Block of Changjiang River[J]. Jiangsu Geology, 2007, 31(3):223-227.
- [30] 徐承香,杨瑞泉,巴家文,等.贵州省威宁草海主要野生鱼类重金属含量及健康风险评价[J].南方农业学报,2020,51(12):3 040-3 048.
XU Chengxiang, YANG Ruiquan, BA Jiawen, et al. Heavy Metal Contents and Health Risk Assessment of Wild Fish Species in Caohai Lake in Weining County, Guizhou Province[J]. Journal of Southern Agriculture, 2020, 51(12):3 040-3 048.
- [31] 施沁璇,孙博悻,王俊,等.钱塘江流域鱼肉中重金属含量特征及食用安全性评价[J].上海海洋大学学报,2017,26(4):536-545.
SHI Qinxuan, SUN Boyi, WANG Jun, et al. Study on Heavy Metal Concentration and Their Food Safety Assessment in the Muscle of Fishes in Qiantang River[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2017, 26(4):536-545.
- [32] 谢文平,陈昆慈,朱新平,等.珠江三角洲河网区水体及鱼体内重金属含量分析与评价[J].农业环境科学学报,2010,29(10):1 917-1 923.
XIE Wenping, CHEN Kunci, ZHU Xinping, et al. Evaluation on Heavy Metal Contents in Water and Fishes Collected from the Waterway in the Pearl River Delta, South China[J]. Journal of Agro-Environment

- Science, 2010, 29(10): 1 917-1 923.
- [33] 曾龄颐. 洞庭湖区淡水鱼化学污染物调查与分析 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012.
- [34] 蔡深文, 倪朝辉, 李云峰, 等. 长江上游珍稀、特有鱼类国家级自然保护区鱼体肌肉重金属残留调查与分析 [J]. 中国水产科学, 2011, 18(6): 1 351-1 357.
- CAI Shenwen, NI Chaohui, LI Yunfeng, et al. Heavy Metal Residues in the Muscle of Fishes from the Rare and Endemic Fishes National Nature Reserve in the Upper Reaches of the Yangtze River, China [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(6): 1 351-1 357.
- [35] CHI Q Q, ZHU G W, LANGDON A. Bio-Accumulation of Heavy Metals in Fishes from Taihu Lake, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(12): 1 500-1 504.
- [36] 陈威, 孟庆庆, 刘婧祎, 等. 松花江野生鱼类重金属残留分析与评价 [J]. 中国环境监测, 2019, 35(2): 91-98.
- CHEN Wei, MENG Qingqing, LIU Jingyi, et al. Analysis and Evaluation of Heavy Metal Residue in Wild Fish in the Songhua River [J]. Environmental Monitoring in China, 2019, 35(2): 91-98.
- [37] AHMAD M K, ISLAM S, RAHMAN M S, et al. Heavy Metals in Water, Sediment and Some Fishes of Buriganga River, Bangladesh [J]. International Journal of Environmental Research, 2010, 4(2): 321-332.
- [38] JARIĆ I, VIŠNJIĆ-JEFTIĆ Ž, CVIJANOVIĆ G, et al. Determination of Differential Heavy Metal and Trace Element Accumulation in Liver, Gills, Intestine and Muscle of Sterlet (*Acipenser ruthenus*) from the Danube River in Serbia by ICP-OES [J]. Microchemical Journal, 2011, 98(1): 77-81.
- [39] SAFIUR RAHMAN M, HOSSAIN MOLLA A, SAHA N, et al. Study on Heavy Metals Levels and Its Risk Assessment in Some Edible Fishes from Bangshi River, Savar, Dhaka, Bangladesh [J]. Food Chemistry, 2012, 134(4): 1 847-1 854.
- [40] MONROY M, MACEDA-VEIGA A, SOSTOA A. Metal Concentration in Water, Sediment and Four Fish Species from Lake Titicaca Reveals a Large-Scale Environmental Concern [J]. Science of the Total Environment, 2014, 487: 233-244.
- [41] WEI Y, ZHANG J, ZHANG D, et al. Metal Concentrations in Various Fish Organs of Different Fish Species from Poyang Lake, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 104: 182-188.
- [42] 陈颖. 城市河流重金属与多氯联苯的污染特征——以上海市苏州河为例 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [43] 倪勇, 伍汉霖. 江苏鱼类志 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [44] 夏福兴, 吴欣然, 陈邦林, 等. 黄浦江上游沉积物中重金属污染研究 [J]. 华东师范大学学报 (自然科学版), 1988(1): 80-86.
- XIA Fuxing, WU Xinran, CHEN Banglin, et al. Study on Heavy Metal Contamination in Sediment of the Upper Reaches of the Huangpu River [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 1988(1): 80-86.
- [45] 项凌云, 陈长春, 刘材材, 等. 上海黄浦江沉积物中的重金属污染趋势 [J]. 海洋环境科学, 2011, 30(1): 64-67.
- XIANG Lingyun, CHEN Changchun, LIU Caicai, et al. Trend of Heavy Metal in Sediment of Shanghai Huangpu Jiang [J]. Marine Environmental Science, 2011, 30(1): 64-67.
- [46] 杨涛, 张昊飞, 胡险峰, 等. 黄浦江表层沉积物重金属生态风险评价 [J]. 海洋开发与管理, 2016, 33(12): 54-60.
- YANG Tao, ZHANG Haofei, HU Xianfeng, et al. Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Huangpu River in Shanghai [J]. Ocean Development and Management, 2016, 33(12): 54-60.
- [47] 李佳凡. 上海市黄浦江重金属和典型新兴污染物的健康风险评价及水质基准研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2019.