

# 太湖流域铜锈环棱螺体内重金属 富集量及膳食风险评价

邓可伟<sup>1, 2</sup> 蒋豫<sup>3</sup> 李颖<sup>2</sup> 宋翠萍<sup>4</sup> 邹亮华<sup>1, 2</sup> 龚志军<sup>2</sup> 蔡永久<sup>2</sup> 鲁顺保<sup>11</sup>

(1. 江西师范大学生命科学学院, 江西 南昌 330022;

2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008;

3. 江苏省生态环境评估中心(江苏省排污权登记与交易管理中心),

江苏 南京 210036; 4. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225127)

**【摘要】:** 对太湖流域6个水系铜锈环棱螺腹足肌肉团Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、As、Hg富集量进行分析, 运用单因子污染指数法评价其受污染程度, 并分别采用平均每周/每月摄入量法和目标危害系数法(THQ)对其膳食风险进行评估, 旨在为居民铜锈环棱螺消费安全提供参考。结果表明, 洮滬水系的Cu、Zn、Pb、Cr元素富集量平均值最高, 分别为112.108、248.625、4.422、7.791mg/kg, 苕溪水系的Cd、As、Hg元素富集量平均值最高, 分别为0.290、2.943、0.059mg/kg。THQ评价结果显示各水系铜锈环棱螺除了As外无单一重金属潜在健康风险, 但多种重金属复合暴露的健康风险(TTHQ)结果显示各水系铜锈环棱螺重金属TTHQ值均大于1, As的贡献率均超过80%, 表明居民长期食用环棱螺具有重金属复合暴露健康风险及As单一重金属潜在健康风险, 重金属复合暴露风险来源于As元素的污染。五个水系潜在重金属复合暴露风险排序为: 洮滬水系>苕溪水系>沿江水系>黄浦江水系>杭州湾-长江口水系。

**【关键词】:** 太湖流域 铜锈环棱螺 重金属污染 膳食风险

**【中图分类号】:** X52; X820.4 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)07-1595-10

重金属元素作为主要环境污染物质, 具有难降解、易积累、毒性大、潜伏性等特性, 其对于环境健康的影响是非常巨大的<sup>[1]</sup>。沉积物中重金属可以被底栖生物摄食从而进入食物链, 并在食物链中富集, 进而可能影响到人类的健康<sup>[2, 3, 4]</sup>, 因此重金属污染问题一直是环境保护和科学研究的重点。底栖动物长期生活在沉积物中, 是监测沉积物重金属污染程度的良好指示生物, 研究表明, 底栖动物腹足纲是某些重金属(如As、Cr)的优良生物监测物种<sup>[5]</sup>。铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*)为腹足纲淡水软体动物, 广泛分布于我国中东部地区, 太湖流域也是主要分布区。铜锈环棱螺是湖泊、河流生态系统底栖动物常见优势种, 主要以着生藻类、有机碎屑为食的刮食者, 几乎不牧食水生植物本身<sup>[6]</sup>。铜锈环棱螺个体适中, 移动性弱, 适应性较强, 常被用作沉积物

**作者简介:** 邓可伟(1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为湿地生态学. E-mail: 944764603@qq.com; 蔡永久 caiyj@niglas.ac.cn; 鲁顺保 E-mail: luxunbao8012@126.com

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(32071572, 31760136); 中国科学院青年创新促进会项目(2020316)

中重金属的生物监测,可以较可靠地反映水环境中重金属的污染情况<sup>[7,8,9]</sup>。此外,铜锈环棱螺还是人类喜爱的水产品,其体内的重金属则会通过食物链传递到人体,从而威胁到人类健康<sup>[7]</sup>。近年来,学者对螺体内有重金属污染的研究异常活跃,陈素兰等<sup>[10]</sup>对长江江苏段生物体内重金属污染进行研究,发现所有调查点螺类重金属污染均超标,其中 Pb 的污染最严重。宋超<sup>[11]</sup>等对长江下游流域研究发现长江安徽段及太湖湖区铜锈环棱螺受到 Pb 和 Cr 的污染,其中 Pb 污染最严重,超标率为 28.57%。桂雨婷等<sup>[12]</sup>对于湖南湘江流域进行了调查,发现湖南六个城市的湘江江段铜锈环棱螺均受到一定程度的重金属污染,其中 As 污染最为严重,其次是 Cd 污染与 Pb 污染。

太湖流域位于长江三角洲地区,属湿润的北亚热带气候区<sup>[13]</sup>。地势低平,河网纵横交错,是典型的平原水网地区。太湖流域总面积约 36895km<sup>2</sup>,是我国经济最发达的区域之一<sup>[14]</sup>。近些年来,流域人口剧增,工农业发展迅速,在人类活动的影响下,河网接纳周边城市排入的生活污水和工农业废水,不仅造成太湖富营养化问题严重,而且重金属污染也日益突出。已有学者报道了太湖重金属污染状况<sup>[15,16]</sup>,但对流域河流的关注相对较少,且多集中在河流沉积物方面<sup>[17]</sup>,较少关注生物体内重金属的残留情况。本文是通过检测铜锈环棱螺体内重金属富集量,评估太湖流域地区重金属的生态风险,并参照 WHO/FAO 食品添加剂联合专家委员会(JECFA)提出的每周可耐受摄入量(PTWI),对铜锈环棱螺的膳食风险进行评估,以期对该类水产品的安全消费提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区域概况

太湖流域内河网密集、水系发达,河流众多,可划分为南河水系、杭州湾-长江口水系、沿江水系、洮湖水系、苕溪水系、黄浦江水系等六大水系(图 1)。南河、洮湖、苕溪水系是主要的入太湖水系,分别约占入太湖水量的 25%、50%、20%;杭州湾-长江口水系、沿江水系、黄浦江水系是主要的出太湖水系,并且这三条水系主要流经城市区。其中,南河水系、苕溪水系均是发源于太湖流域西部丘陵地区;洮湖水系则是主要包括常州市、无锡市以及镇江市的一部分<sup>[18]</sup>。

### 1.2 采样点布设与样品采集

样品于 2015 年 8 月采集一次。在太湖流域预设了 60 个采样点,其中采集到铜锈环棱螺的采样点共有 35 个(图 1),其中南河水系 1 个,杭州湾-长江口水系 5 个,沿江水系 8 个,洮湖水系 8 个,苕溪水系 8 个,黄浦江水系 4 个,鉴于南河水系仅一个样点,不纳入下文的分析。每一个样点利用 D 形抄网采集 3 次,将筛洗后的样品装入聚乙烯自封袋中,带回实验室。

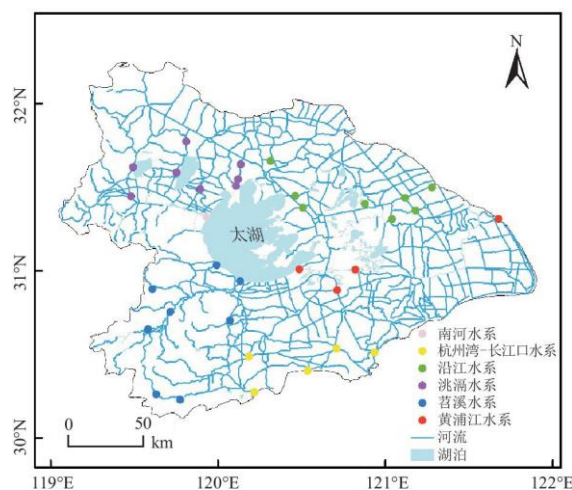


图 1 太湖流域采样点位置示意图

### 1.3 样品处理及分析

对于已经初步筛选的样品再次洗涤,去除剩余杂质后,将样品放入带有少量清水的实验盘中,用镊子挑出铜锈环棱螺活体,零下 20℃冷冻保存。由于铜锈环棱螺个体较小并且每个采样点采集到的铜锈环棱螺数量不同,将每个样点采集到的全部样品合并为一份样品,总共 35 份样品。每份样品测量壳长、壳宽、质量等形态参数之后解剖,取常食用的足部肌肉部分放入恒温培养箱内 60℃烘干、研磨。重金属 Hg 的测定用 Mercury Instruments-测汞仪 (Lab254, 德国),重金属 Cu、Zn、Pb、Cr、As、Cd 的测定用电感耦合等离子质谱仪 (ICP-MS, 7900, 安捷伦, 美国)进行。

### 1.4 评价方法

#### 1.4.1 数据统计与分析

数据分别采用 SPSS20.0 软件进行统计分析,并以平均值±标准差表示。不同水系之间采用单因素方差分析,差异显著时 ( $P<0.05$ )采用 Duncan 法进行多重比较。采用相关性分析评价螺长、螺宽、螺重、腹足肌肉干重等参数对于重金属富集量的影响。

#### 1.4.2 污染程度评价标准

铜锈环棱螺重金属污染程度评价采用单因子污染指数法进行评价,公式为:

$$P_i = C_i/C_{si} \quad (1)$$

式中:  $P_i$  为单因子污染指数;  $C_i$  为第  $i$  种污染物的实际测量值 (mg/kg);  $C_{si}$  为第  $i$  种污染物的标准值 (mg/kg)。污染指数  $P_i<0.2$  时为未污染水平;  $0.2\leq P_i\leq 0.6$  时为轻污染水平;  $0.6<P_i<1.0$  时为中污染水平;  $P_i\geq 1.0$  时为重污染水平。

目前我国尚无针对淡水水产品的重金属限量标准,本研究中 Pb、Cr、Cd 限量值采用《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB2762-2017)<sup>[19]</sup> (分别是 1.0、2.0 和 2.0mg/kg), Cu 的限量值 (50mg/kg) 采用《无公害食品水产品中有毒有害物质限量》(NY5073-2006)<sup>[20]</sup>, Zn、As、Hg 限量值参考《海洋生物质量和限量标准》第一类和限量标准<sup>[21]</sup> (250、1.0、1.0mg/kg)。

#### 1.4.3 膳食风险评估

通过计算成人每周/每月摄入量值与 JECFA 提出的各类重金属的 PTWI 值做比较,综合评定食用铜锈环棱螺的生态风险。计算方法为:

$$DI = C * M/BW * N \quad (2)$$

式中: DI 为每周/每月摄入量; C 为重金属富集量, mg/kg; M 为每人每天摄食铜锈环棱螺的量, g/d; BW 为人的体重; N 为摄食天数。2002 年总膳食调查显示: 消费人群为成年人, 其体重取值为 60kg, 铜锈环棱螺日消费量取 20g, 摄食天数取 7 天即计算每周摄入量, 元素富集量取算术平均值和最高富集量<sup>[12]</sup>。

根据报道和调查资料, JECFA 推荐的食用贝类重金属的临时性周可承受摄入量 (PTWI 值) 分别为 Pb25.0  $\mu$ g/kg、Cd7.0  $\mu$ g/kg、Hg5.0  $\mu$ g/kg、As15.0  $\mu$ g/kg、Cu3500  $\mu$ g/kg、Zn7000  $\mu$ g/kg、Cr6.70  $\mu$ g/kg<sup>[11, 12, 22]</sup>。

健康风险评估方法通常基于目标危害系数 (THQ), THQ 根据美国环境保护局建立的方法测定, 可用于同时评价单一重金属暴露健康风险 (Target Hazard Quotient, THQ) 和多种重金属复合暴露健康风险 (Total Target Hazard Quotient, TTHQ)。THQ<1 代表没有健康风险, THQ≥1 则表明摄食人群将面临健康风险。THQ、TTHQ 计算参考高蜜等<sup>[23]</sup>对于海产品健康风险分析办法, 公式为:

$$THQ = (C \times FIR \times EF \times ED) / (RfDo \times BW \times AT) \tag{3}$$

$$TTHQ = \sum_{i=0}^N THQ_i \tag{4}$$

式中: C 为铜锈环棱螺重金属富集量, mg/kg; FIR 为食量大小 (20g/d); EF 为人群暴露频率 (365d/a); ED 为暴露时间 (70 年); RfDo 为参考暴露剂量, As、Cd、Pb、Cu、Zn、Cr 的参考暴露剂量分别是 0.3、1、3.5、40、300、3.0 μg/(kg·d)<sup>[24]</sup>; BW 为体重 (60kg); AT 为暴露量分摊时间: 365d\*暴露年数 (70 年)

2 结果与讨论

2.1 铜锈环棱螺的形态特征

洮滹水系样品螺长、螺宽、螺重量及腹足肌肉干重最大, 其次是杭州湾-长江口水系样品, 苕溪水系样品螺长、螺宽、腹足肌肉干重最小, 沿江水系样品螺重量最小; 各水系采集的样品并无显著性差异 (表 1)。

相关性分析表明, 铜锈环棱螺螺长、螺宽、螺重量与 Cd 元素含量显著负相关 (P=0.015、P=0.043、P=0.037), 腹足肌肉干重与 Cd 元素含量极显著负相关 (P=0.010); 4 个形态特征参数与其余元素相关性不显著。

表 1 太湖流域各水系铜锈环棱螺形态参数

| 水系        | 样点数 | 样品总数 | 螺长 (mm)    | 螺宽 (mm)    | 腹足肌肉干重 (g) | 重量 (g)    |
|-----------|-----|------|------------|------------|------------|-----------|
| 洮滹水系      | 8   | 113  | 22.93±2.99 | 14.65±1.48 | 0.15±0.07  | 2.39±0.80 |
| 沿江水系      | 6   | 77   | 21.61±3.37 | 14.03±1.65 | 0.12±0.05  | 1.93±0.75 |
| 苕溪水系      | 8   | 68   | 20.74±3.15 | 13.83±1.66 | 0.11±0.04  | 2.12±0.93 |
| 黄浦江水系     | 8   | 91   | 21.25±3.57 | 13.62±1.72 | 0.12±0.06  | 1.96±0.81 |
| 杭州湾-长江口水系 | 4   | 49   | 22.80±1.98 | 14.42±1.13 | 0.15±0.05  | 2.38±0.66 |

2.2 铜锈环棱螺的重金属富集量

铜锈环棱螺腹足肌肉团重金属 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、As、Hg 富集量范围分别为 87.78~112.1、201.86~249、1.76~4.42、4.12~7.79、0.04~0.29、2.04~2.94、0.03~0.06mg/kg。结果表明, Cu、Zn 元素富集量远大于其他元素富集量, Cd 与 Hg 元素富集量最低, 与太湖螺类肌肉重金属富集量的差异相符合<sup>[25, 26]</sup>。实验结果表明, 五个水系的铜锈环棱螺 Cu 元素富集量均超过标准限定值, 其中洮滹水系的铜锈环棱螺的 Cu 富集量最大, 沿江水系和黄浦江水系次之, 苕溪水系和杭州湾-长江口水系较低;

各水系铜锈环棱螺 As 元素富集量均超过标准限定值, 其中苕溪水系铜锈环棱螺 As 元素富集量最高, 洮滹水系、沿江水系次之, 杭州湾长江口水系最低; 五个水系铜锈环棱螺 Pb 元素富集量和 Cr 元素富集量均超过标准限定值, 其中洮滹水系铜锈环棱螺的 Pb 元素、Cr 元素富集量最高, 苕溪水系铜锈环棱螺的 Pb 元素富集量仅次于洮滹水系, Cr 元素富集量小于洮滹水系和沿江水系, 沿江水系铜锈环棱螺 Pb 元素富集量高于黄浦江水系以及杭州湾-长江口水系, 低于洮滹水系以及苕溪水系, 黄浦江水系铜锈环棱螺 Pb、Cr 元素富集量最低, 杭州湾-长江口水系的铜锈环棱螺 Pb、Cr 元素富集量略高于黄浦江水系。5 个水系的铜锈环棱螺 Zn、Cd、Hg 元素富集量未超过标准限定值(图 2)。

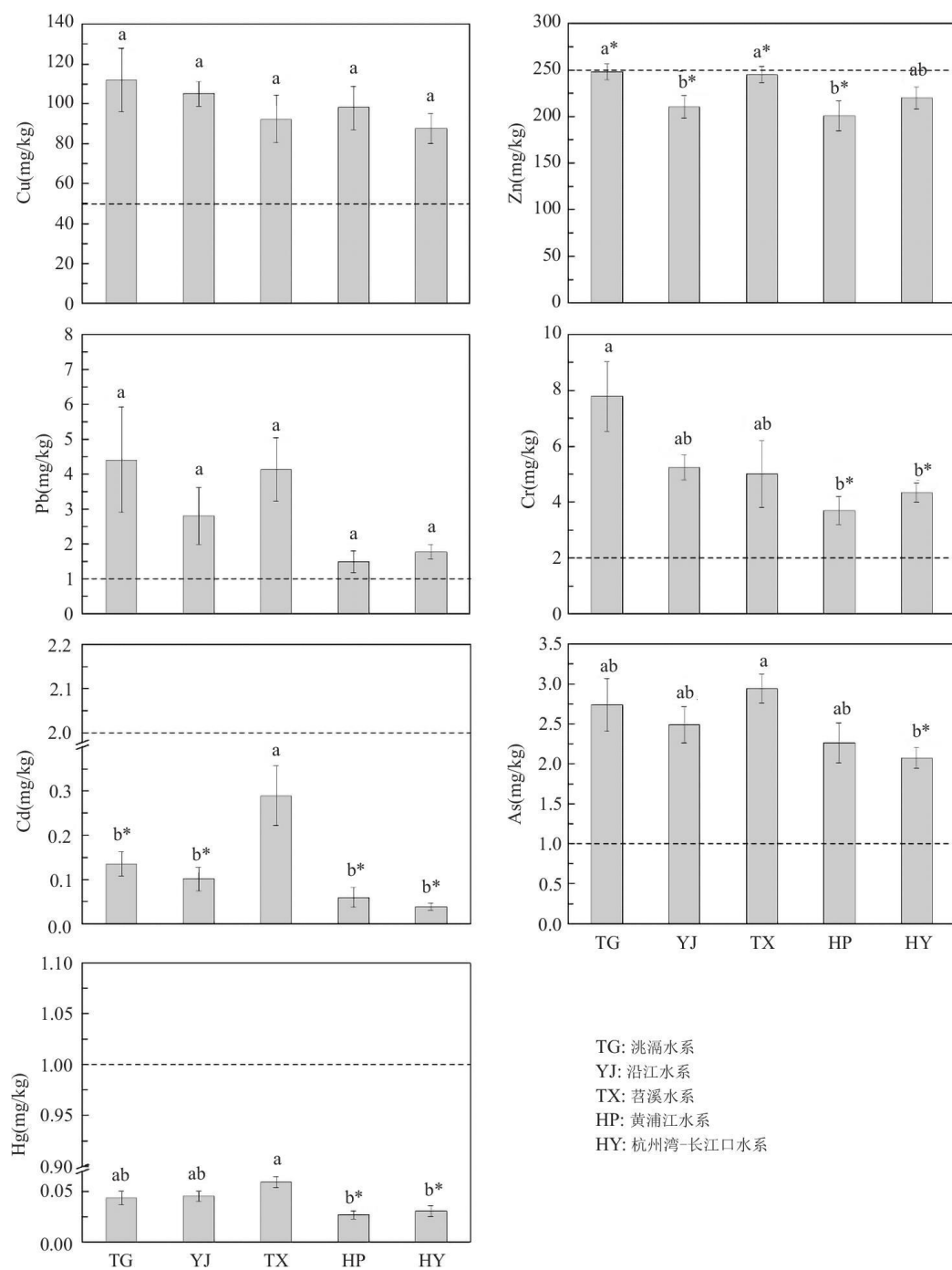


图 2 各水系铜锈环棱螺重金属富集量

注：虚线表示国家食品中重金属限量标准；不同小写字母表示不同水系重金属富集量差异性；\*表示不同水系重金属富集量差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Cu 与 Zn 元素是生物所必需的微量元素。在生物体内生命必需元素含量一般高于生命非必需元素含量<sup>[27]</sup>。有学者研究表明，螺类对于 Cu、Zn 的富集能力较强，可能达到数十万倍<sup>[28]</sup>。Cu、Zn 会参与到生物体内的新陈代谢，因此铜锈环棱螺腹足肌肉中 Cu 元素、Zn 元素富集量较高。然而 Cu 元素和 Zn 元素虽然是生物体必不可缺的微量元素，但是人类摄入过多的 Cu 元素和 Zn 元素依旧会引起中毒。As 是一种具有蓄积性毒性的重金属元素，近年来食品中 As 污染事件频发，对人体健康造成严重威胁<sup>[29]</sup>。Cd 是一种生物蓄积性很强的有毒金属元素，生物半衰期较长，生物毒性极强<sup>[30]</sup>，对人体免疫、泌尿、骨骼、神经等系统易造成损伤，甚至会产生致癌效应<sup>[31]</sup>；Cr 是人体必需的微量元素之一，Cr 元素在自然界主要以三价和六价两种形式存在，三价铬对血糖的调节和提高免疫力有一定的作用，但六价铬则有较大的毒害作用，摄入过多的 Cr 会通过消化道、呼吸道系统最终积累在肝脏、肾脏等器官，对人类健康造成危害<sup>[32]</sup>；Pb 元素也是一种有毒元素，人体摄入过量的 Pb 元素会引起中枢神经系统的损伤、贫血等疾病<sup>[33]</sup>。

### 2.3 重金属污染程度评价

洮湍水系样点铜锈环棱螺 Cu、Pb、Cr、As、Zn 超标率为 100%、87.5%、100%、100%、50%；沿江水系样点铜锈环棱螺 Cu、Zn、Pb、Cr、As 超标率为 100%、16.7%、66.7%、100%、100%；苕溪水系样点铜锈环棱螺 Cu、Zn、Pb、Cr、As 超标率为 87.5%、50%、100%、100%、100%；黄浦江水系样点铜锈环棱螺 Cu、Pb、Cr、As 超标率为 100%、87.5%、100%、100%；杭州湾-长江口水系样点铜锈环棱螺 Cu、Zn、Pb、Cr、As 超标率为 100%、20%、100%、100%、100%。

根据单因子污染指数法，洮湍水系全部样点 Cu、Cr、As 均处于重度污染水平，Pb 重度污染水平的样点占比为 87.5%，Zn 重度污染水平的样点占比为 50%；沿江水系 Cu、Cr、As 全部处于重度污染水平，Pb 处于重度污染水平的样点占 66.7%，Zn 处于重度污染水平的样点占比为 16.7%。苕溪水系全部样点 Pb、Cr、As 均处于重度污染水平，Cu、Zn 重度污染水平的样点占比分别为 87.5%、50%；黄浦江水系 Cu、Cr、As 全部处于重度污染水平，Pb 元素重度污染水平的样点占全部样点的 87.5%；杭州湾-长江口水系全部样点 Cu、Pb、As、Cr 均处于重度污染水平，Zn 元素重度污染水平的样点占全部样点的 20% (图 3)。

结果表明，洮湍水系、苕溪水系受到 Pb 污染水平最重，其次是 Cr、As、Cu；黄浦江水系受到 As 污染水平最重，其次是 Cr、Cu、Pb；沿江水系受到 Pb 污染水平最重，其次是 Cr、As、Cu，Zn 污染水平最低；杭州湾-长江口水系受到 Cr 污染水平最重，其次是 As、Pb、Cu、Zn (表 4)。综合各水系情况，Cu、Pb、As、Cr 是太湖流域的主要重金属污染元素。

洮湍水系河流主要流经城镇以及高度集约化的农业生产区，因此洮湍水系重金属污染可能与工业废水、城镇生活污水以及农业畜牧业污染排放直接相关<sup>[34]</sup>。苕溪水系主要土地利用类型为林地，同时也受到农业面源污染影响。黄浦江水系、沿江水系、杭州湾-长江口水系不仅流经城市区且水上交通发达，由于煤与石油等燃料的使用，船舶产生的重金属污染可能进入水体，因此水系重金属污染不仅与城镇生活污染有关，还与船只的活动有关<sup>[14]</sup>。Cu 元素主要来自于农药以及工业废水的排放<sup>[35]</sup>，太湖流域北部地区工农业发达，农药使用量较大<sup>[36]</sup>，因此洮湍水系和沿江水系要高于其余 3 个水系。Pb 元素主要来自于生活污水和农业污染排放，部分 Pb 还来自于汽油燃烧和工业排放<sup>[14]</sup>。洮湍水系河流主要流经常州市、无锡市以及镇江市，受生活污水和工业排放影响较为严重，苕溪水系主要流经地区土地利用类型为耕地和林地，受农业污染排放较为严重，有研究表明，有机肥的长期施用，对土壤 Pb、Cd 等重金属的累积效应显著，同时西部河网也是污染物进入太湖的主要通道，因此洮湍水系、苕溪水系铜锈环棱螺 Pb 元素富集量较高<sup>[37, 38]</sup>。沿江水系、黄浦江水系、杭州湾-长江口水系是主要的出太湖水系，Pb 元素富集量较洮湍水系、苕溪水系低，可能的原因是经过太湖净化，出太湖河流水质明显好于入太湖河流水质且沿江水系河流受到的工业污染较洮湍水系低，黄浦江水系、杭州湾-长江口水系河流主要是畜禽养殖污染<sup>[39]</sup>；Cr 元素除了受岩石风化、侵蚀等自然因素影响外，还受到电镀和合金制造行业方面的影响，太湖流域北部地区电镀及合金制造行业发达，经济水平较高，因此流经常州市、无锡市以及镇江市的洮湍水系 Cr 元素富集量最高。As 元素同样主要来源于农药及工业废水排放<sup>[37]</sup>，因此受到农业污染较为严重的苕溪水系最高，处于

太湖流域北部工业发达地区的洮滬水系、沿江水系次之，杭州湾长江口水系、黄浦江水系较低。已有研究显示洞庭湖湘江流域铜锈环棱螺存在 As、Cd、Pb、Cu、Cr 污染<sup>[12]</sup>，长江下游安徽江段铜锈环棱螺具有 Cr、Pb 污染<sup>[11]</sup>，而太湖流域铜锈环棱螺存在 Cu、Pb、Cr、As 污染，这表明太湖流域铜锈环棱螺重金属污染种类数较洞庭湖湘江流域少，较长江下游安徽江段多。

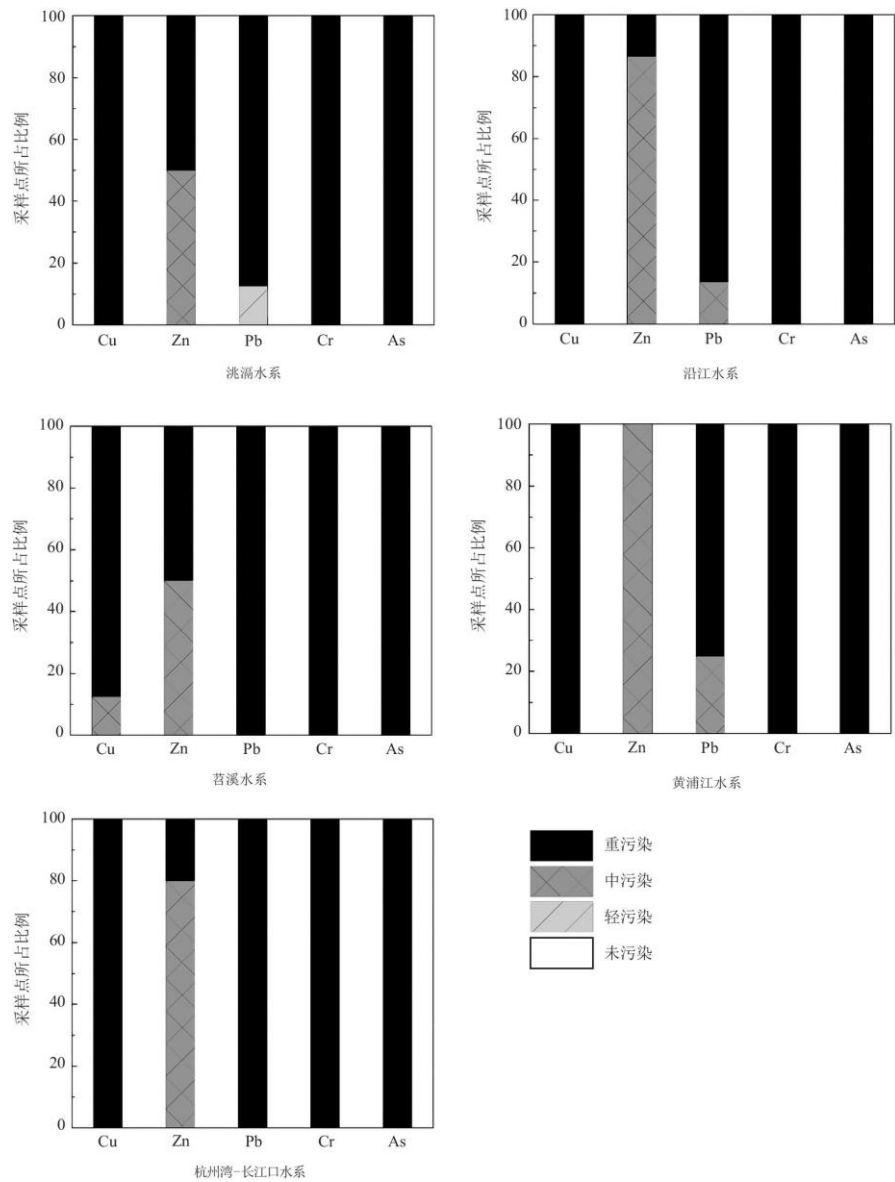


图 3 太湖流域各水系铜锈环棱螺重金属污染水平

2.4 膳食风险评估

将本研究中成人对于太湖流域各水系铜锈环棱螺重金属的每周摄入量与参考值 PTWI 进行比较，各水系成人每周 Cu、Zn、Pb、Cr、As 摄入量均值已超过参考值，各水系成人每周 As 摄入量均值更是参考值的 10 倍左右。苕溪水系成人每周 Cd 摄入量超过相应参考值，其余各水系均低于相应参考值。各水系成人每周 Hg 摄入量均低于相应参考值(表 3)。

表 2 太湖流域各水系铜锈环棱螺重金属污染指数值(Pi 值)

| 水系        | Cu   | Zn   | Pb   | Cr   | Cd   | As   | Hg   |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|
| 洮滹水系      | 2.24 | 0.99 | 4.42 | 3.90 | 0.07 | 2.74 | 0.04 |
| 沿江水系      | 3.41 | 1.15 | 1.43 | 2.08 | 0.10 | 2.48 | 0.04 |
| 苕溪水系      | 2.10 | 0.84 | 2.81 | 2.63 | 0.05 | 2.49 | 0.05 |
| 黄浦江水系     | 1.85 | 0.98 | 4.14 | 2.51 | 0.14 | 2.94 | 0.06 |
| 杭州湾-长江口水系 | 1.96 | 0.80 | 1.50 | 1.86 | 0.03 | 2.27 | 0.03 |

对于各水系单一重金属 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 的目标危险系数 (THQ) 进行计算, 结果均小于 1, 表明成人食用各水系铜锈环棱螺未有 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 潜在健康风险; 各水系的 As 的目标危险系数 (THQ) 远大于 1, 表明成人食用各水系铜锈环棱螺存在较大的 As 元素潜在健康风险。比较 5 个水系混合重金属潜在风险排序为: 洮滹水系>苕溪水系>沿江水系>黄浦江水系>杭州湾-长江口水系。各水系 TTHQ 值均远大于 1 (表 4), 表明成人食用该水系铜锈环棱螺后均存在混合重金属健康风险, 且洮滹水系最为严重。其中 As 对于各水系的 TTHQ 值贡献率最高, 表明太湖流域各水系中 As 为主要风险元素, 应优先关注 As 的防控, 建议相关部门建立相应摄入标准, 并进行污染情况方面的宣传, 以减少居民摄入污染物的风险。

表 3 成人对于太湖流域铜锈环棱螺每周/每月摄入量 (DI 值)

| 金属 | 洮滹水系   | 沿江水系  | 苕溪水系   | 黄浦江水系  | 杭州湾-长江口水系 | PTWI   |
|----|--------|-------|--------|--------|-----------|--------|
| Cu | 5.338  | 4.956 | 4.394  | 4.778  | 4.180     | 3.500  |
| Zn | 11.839 | 9.613 | 11.689 | 10.405 | 10.023    | 7.000  |
| Pb | 0.211  | 0.145 | 0.197  | 0.088  | 0.084     | 0.025  |
| Cr | 0.371  | 0.26  | 0.239  | 0.196  | 0.216     | 0.0067 |
| Cd | 0.007  | 0.004 | 0.014  | 0.004  | 0.002     | 0.007  |
| As | 0.131  | 0.125 | 0.140  | 0.107  | 0.097     | 0.015  |
| Hg | 0.002  | 0.002 | 0.003  | 0.002  | 0.001     | 0.005  |

表 4 成人食用太湖铜锈环棱螺的目标危害系数

| 水系   | Cu    | Zn    | Pb    | Cr    | Cd    | As    | TTHQ  |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 洮滹水系 | 0.934 | 0.276 | 0.421 | 0.866 | 0.046 | 3.047 | 5.590 |
| 沿江水系 | 0.867 | 0.224 | 0.291 | 0.608 | 0.026 | 2.917 | 4.934 |
| 苕溪水系 | 0.769 | 0.273 | 0.394 | 0.557 | 0.097 | 3.270 | 5.360 |



|           |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 黄浦江水系     | 0.836 | 0.243 | 0.177 | 0.458 | 0.031 | 2.502 | 4.246 |
| 杭州湾-长江口水系 | 0.732 | 0.234 | 0.167 | 0.504 | 0.012 | 2.263 | 3.911 |

### 3 结论

(1)太湖流域各水系铜锈环棱螺 Cu、Zn 富集量最高，远高于其余重金属元素，Cd、Hg 富集量最低。各水系铜锈环棱螺均受到一定程度的重金属污染。Cu、Pb、As、Cr 这 4 种元素是太湖流域各水系河流铜锈环棱螺的主要重金属污染元素。

(2)目标危害系数(THQ)结果显示各水系铜锈环棱螺 Zn、Pb、Cd 元素 THQ 值远小于 1;Cu、Cr 元素 THQ 值接近 1;As 元素 THQ 值远大于 1,且 As 对于 TTHQ 值的贡献均超过了 80%。表明太湖流域各水系铜锈环棱螺中 As 为主要风险元素，应当予以足够的重视，并优先防控。

#### 参考文献:

- [1]蔡云,魏永军,李舵,等.重金属重点防控区综合整治研究——以某金属表面处理科技工业园为例[J].污染防治技术,2019,32(6):2-4,16.
- [2]LEE B G, SARAH B G, LEE J S, et al. Influences of dietary uptake and reactive sulfides on metal bioavailability from Aquatic Sediments[J]. Science, 2000, 287(5451):282-282.
- [3]STRONM D, SIMPSON S L, BATLEY G E, et al. The influence of sediment particle size and organic carbon on toxicity of copper to benthic invertebrates in oxic/suboxic surface sediments[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2011, 30(7):599-610.
- [4]PETKOVSEK S A S, GRUDNIK Z M, POKORNY B. Heavy metals and arsenic concentrations in ten fish species from the alek lakes (Slovenia):assessment of potential human health risk due to fish consumption[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, 184(5):2647-2662.
- [5]LI D L, JIE P, ZHANG T, et al. Evaluating a 5-year metal contamination remediation and the biomonitoring potential of a freshwater gastropod along the Xiangjiang River, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(21):1-11.
- [6]蔡永久, 龚志军, 秦伯强. 太湖大型底栖动物群落结构及多样性[J]. 生物多样性, 2010, 18(1):50-59.
- [7]马陶武, 朱程, 王桂岩, 等. 铜锈环棱螺对沉积物中重金属的生物积累及其与重金属赋存形态的关系[J]. 应用生态学报, 2010, 21(3):734-742.
- [8]马陶武, 朱程, 周科, 等. 铜锈环棱螺对铅污染沉积物慢性胁迫的繁殖响应和氧化应激反应敏感性[J]. 生态学报, 2009, 29(10):5350-5357.
- [9]马陶武, 周科, 朱程, 等. 铜锈环棱螺对镉污染沉积物慢性胁迫的生物标志物响应[J]. 环境科学学报, 2009, 29(8):1750-

1756.

- [10]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.
- [11]宋超, 张聪, 孟顺龙, 等. 长江下游流域铜锈环棱螺体内重金属含量及风险评估[J]. 中国渔业质量与标准, 2016, 6(4):6-11.
- [12]桂雨婷, 王健, 余建波, 等. 洞庭湖流域湘江铜锈环棱螺的重金属富集特征及膳食风险评估[J]. 湖泊科学, 2019, 31(3):724-733.
- [13]欧维新, 刘翠, 陶宇. 太湖流域水供给服务供需时空演变分析[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(3):623-633.
- [14]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):2202-2210.
- [15]廖静. 我国太湖水体中重金属污染分布特征及铅水质基准推导[D]. 南京: 南京大学, 2014.
- [16]柳后起, 方正, 孟岩, 等. 环太湖水体污染现状分析[J]. 生态环境学报, 2020, 29(11):2262-2269.
- [17]于佳佳, 尹洪斌, 高永年, 等. 太湖流域沉积物营养盐和重金属污染特征研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(6):2287-2294.
- [18]WU Z S, WANG X L, CHEN Y W, et al. Assessing river water quality using water quality index in Lake Taihu Basin, China[J]. Science of The Total Environment, 2018, 612:914-922.
- [19]中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会&国家食品药品监督管理总局. GB2762-2017 食品安全国家标准食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [20]中华人民共和国农业部. NY5073-2006 无公害食品水产品中有毒有害物质限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [21]孙丕喜, 郝林华, 杜蓓蓓, 等. 桑沟湾重金属对海洋环境影响和食用贝类的健康风险评估[J]. 海洋科学进展, 2014, 32(2):249-258.
- [22]世界卫生组织/联合国粮食及农业组织. 食品安全风险分析-国家食品安全管理机构应用指南[Z]. 北京: 人民卫生出版社, 2006:30-33.
- [23]高蜜, 吴星, PAUL L K, 等. 葫芦岛海产品重金属含量及健康风险分析[J]. 生态学杂志, 2016, 35(1):205-211.
- [24]GUO L C, ZENG E Y. Broadening the global reach of the United States Environmental Protection Agency (USEPA) is vital to combating globalized environmental problems. [J]. Environmental science & technology, 2010, 44(18):6911-3.
- [25]BO L J, WANG D J, LI Y, et al. Accumulation and risk assessment of heavy metals in water, sediments, and aquatic organisms in rural rivers in the Taihu Lake Region, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 22(9):6721-6731.

- 
- [26] KONG M, HANG X S, WANG L M, et al. Accumulation and risk assessment of heavy metals in sediments and zoobenthos (*Bellamya aeruginosa* and *Corbicula fluminea*) from Lake Taihu[J]. *Water Science & Technology*, 2016, 73(1): 203-214.
- [27] 陈道海, 宋绍珠. 3 种经济螺体内 4 种重金属元素含量及评价[J]. *台湾海峡*, 2009, 28(1): 65-70.
- [28] 袁维佳, 俞膺浩, 谷瑗, 等. 螺蛳对重金属元素的富集作用[J]. *上海师范大学学报(自然科学版)*, 2000, 13(3): 73-79.
- [29] 常学秀, 文传浩, 王焕校. 重金属污染与人体健康[J]. *云南环境科学*, 2000, 28(1): 59-61.
- [30] 杜丽娜, 余若祯, 王海燕, 等. 重金属镉污染及其毒性研究进展[J]. *环境与健康杂志*, 2013, 30(2): 167-174.
- [31] 邓新, 温璐璐, 迟鑫姝. 镉对人体健康危害及防治研究进展[J]. *中国医疗前沿*, 2010, 5(10): 4-5.
- [32] 张聪, 宋超, 裘丽萍, 等. 太湖鱼体中重金属铬的含量及风险评估[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(7): 1254-1260.
- [33] 陈海仟, 张美琴, 吴光红, 等. 中华绒螯蟹对 Pb 和 Cd 的富集与释放特性[J]. *水生生物学报*, 2010, 34(4): 828-836.
- [34] WU Z S, WANG X L, CHEN Y W, et al. Assessing river water quality using water quality index in Lake Taihu Basin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 612: 914-922.
- [35] 魏大成. 环境中砷的来源[J]. *国外医学: 医学地理分册*, 2003, 24(4): 173-175.
- [36] 蒋豫, 魏永军, 蔡永久, 等. 太湖流域沉积物中有机氯农药空间分布特征及风险评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(2): 387-395.
- [37] 田自强, 韩梅, 张雷. 西太湖河网区恢复与退化河岸带湿地生态及水环境功能比较[J]. *生态学报*, 2007, 20(7): 2812-2822.
- [38] 金智, 胡雪峰, 蓝文翀, 等. 施用粪肥和菇渣对作物重金属累积的影响[J/OL]. *上海大学学报(自然科学版)*: 1-11 [2021-05-16].
- [39] 卢少勇, 焦伟, 王强, 等. 环太湖河流水质时空分布特征[J]. *环境科学研究*, 2011, 24(11): 1220-1225.