

洞庭湖流域湘江铜锈环棱螺 (*Bellamyia aeruginosa*) 的重金属富集特征及其膳食风险评估*

桂雨婷¹, 王 健¹, 余建波^{1,2**}, 皮 杰¹, 李德亮^{1,2**}

(1: 湖南农业大学动物科学技术学院, 湖南省特色水产资源利用工程技术研究中心, 长沙 410128)

(2: 水产高效健康生产湖南省协同创新中心, 常德 415000)

摘要: 洞庭湖流域对湘江湖南段 6 个城市江段铜锈环棱螺 (*Bellamyia aeruginosa*) 腹足和内脏团的 As、Cd、Pb、Cu、Zn、Cr 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对其膳食风险进行评估, 旨在为湘江流域居民铜锈环棱螺的消费安全提供参考。结果显示, 铜锈环棱螺腹足 As、Cd、Pb、Cu 和 Zn 的富集量均值分别为 0.92、1.65、0.90、13.01 和 67.62 mg/kg, Cr 未检出, As、Cd、Pb 和 Cu 的超标率分别为 87.06%、27.06%、24.72% 和 2.35%。内脏团 As、Cd、Pb、Cu、Zn 和 Cr 的富集量均值分别为 9.61、3.21、3.75、33.58、169.05 和 1.23 mg/kg, As、Cd、Pb、Cu 和 Cr 超标率分别为 100%、71.76%、65.88%、14.12% 和 75.8%。所有江段成人 As、Cu 和 Zn 的每周摄入量均值和最高值均低于 FAO/WHO 食品添加剂联合专家委员会 (JECFA) 提出的暂定每周耐受摄入量参考值 (PTWI), 但株洲成人 Cd 的每月摄入量均值超过其每月耐受摄入量参考值, 且最大值是其参考值的 3.44 倍, 永州、湘潭地区成人 Cd 的每月摄入量最大值也分别是其参考值的 1.16 和 1.68 倍。所有江段铜锈环棱螺摄入的单一重金属健康风险值除 As 外均小于 1, 但多种重金属复合暴露健康风险值均接近或大于 1。结果表明, 湘江湖南段 6 个城市江段铜锈环棱螺均受到一定程度的污染, 其中衡阳、湘潭和株洲江段较为严重, 且各江段铜锈环棱螺内脏团重金属富集量整体上均高于腹足, 故当地居民长期食用后存在潜在的健康风险。

关键词: 湘江; 铜锈环棱螺; 重金属污染; 膳食风险

Accumulation characteristics of heavy metals and dietary risk assessment of *Bellamyia aeruginosa* in the Xiangjiang River, Lake Dongting Basin

GUI Yuting¹, WANG Jian¹, YU Jianbo^{1,2**}, PI Jie¹ & LI Deliang^{1,2**}

(1: Hunan Engineering Technology Research Center of Featured Aquatic Resources Utilization, College of Animal Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, P.R.China)

(2: Collaborative Innovation Center for Efficient and Health Production of Fisheries in Hunan Province, Changde 415000, P. R.China)

Abstract: To provide food safety information of *Bellamyia aeruginosa* in Hunan, six populations from urban sections along Xiangjiang River, Lake Dongting Basin were collected for analyzing their bioaccumulation characteristics of six heavy metals (As, Cd, Pb, Cu, Zn and Cr) in foot and visceral masses. The pollution and dietary risk of heavy metals were also assessed using different approaches, including the single factor pollution index method, the weekly/monthly average intakes method and the target hazard quotient (THQ) method, respectively. The results showed that the average bioaccumulation values of As, Cd, Pb, Cu and Zn in the foot were 0.92, 1.65, 0.90, 13.01 and 67.62 mg/kg, respectively, while Cr was not detected. The excesses of As, Cd, Pb and Cu in the foot were 87.06%, 27.06%, 24.72% and 2.35%, respectively. The average bioaccumulation values of As, Cd, Pb, Cu, Zn and Cr in the visceral masses were 9.61, 3.21, 3.75, 33.58, 169.05 and 1.23 mg/kg, respectively. The excesses of As,

* 国家公益性行业 (农业) 科研专项经费项目 (201503108)、湖南省教育厅重点项目 (17A099) 和湖南省重点研发计划项目 (2017NK2291) 联合资助。2018-08-31 收稿; 2018-10-14 收修改稿。桂雨婷 (1992~), 女, 硕士研究生; E-mail: guiyuting11@foxmail.com.

** 通信作者; E-mail: lidengliang80@aliyun.com; yujb5132@163.com.

Cd, Pb, Cu and Cr in the visceral masses were 100%, 71.76%, 65.88%, 14.12% and 75.8%, respectively. The mean and maximum weekly intakes of As, Pb, Cu, and Zn for adult in all analyzed sections were lower than the tentative weekly tolerable intake reference value (PTWI) proposed by the Joint FAO/WHO Joint Committee of Experts on Food Additives (JECFA). However, the average monthly Cd intake of adults along the Zhuzhou sections exceeds the monthly tolerance intake reference value, and the maximum value is 3.44 times of the reference value. The maximum monthly Cd intake of adults in the Yongzhou and Xiangtan sections are 1.16 and 1.68 times of their corresponding reference values, respectively. Except As, the *THQ* value of *Bellamyia aeruginosa* was far less than 1, but all *TTHQ* values were equal or greater than 1. Overall, the results indicated that the *B. aeruginosa* in the six urban sections along Xiangjiang River were under a certain pollution, especially in Hengyang, Xiangtan and Zhuzhou. Furthermore, the amount of heavy metal bioaccumulation in the visceral masses of the *B. aeruginosa* in each river section was higher than that of the foot. Therefore, there are potential health risks of *B. aeruginosa* via long-term consumption by residents along the Xiangjiang River.

Keywords: Xiangjiang River; *Bellamyia aeruginosa*; heavy metal pollution; dietary risk assessment

湘江发源于广西东北部的海洋山西麓,是洞庭湖水系中最大的河流,也是湖南人民赖以生存和发展的重要基础^[1]. 湘江流域重金属产业历史悠久,分布有郴州三十六湾、衡阳水口山、株洲清水塘、湘潭竹埠港、长沙坪塘及岳阳汨罗循环经济工业园等重点工业区,这些工业园区排污是湘江干流重金属污染的主要来源^[2]. 近年来,湘江流域重金属污染问题受到政府和社会的广泛和持续关注^[3-5].

湘江流域生境复杂多样,软体动物资源十分丰富,有腹足纲 38 种,双壳纲 34 种,铜锈环棱螺(*Bellamyia aeruginosa*)作为优势物种分布极其广泛,几乎遍布整个湘江水域^[6-7]. 铜锈环棱螺为腹足纲淡水软体动物,主要以水生植物嫩茎叶、有机碎屑为食,是典型的刮食者^[8],既可以作为鱼类的天然饵料,也可以供人类食用,是人们喜欢的食物——嗦螺的主要原料来源^[9]. 研究表明,铜锈环棱螺具有较强的重金属富集能力^[10],被认为是理想的重金属污染生物指示物之一^[11]. 富集到铜锈环棱螺体内的重金属可以沿食物链迁移和累积,人们食用受污染的嗦螺则可能会带来潜在的膳食风险^[12]. 研究显示,东洞庭湖方形环棱螺(*Bellamyia quadrata*)体内重金属含量均低于国家《无公害食品 水产品中有毒有害物质限量》(NY5073-2006)标准和人体消费标准^[13]. 此外,长江下游和汉江下游流域及太湖铜锈环棱螺体内重金属的富集量及其潜在健康风险已有详细报道^[14-17],但有关湘江流域铜锈环棱螺健康风险的评价尚未见报道.

本研究在分析湘江湖南段 6 个城市江段 17 个断面铜锈环棱螺腹足和内脏团的重金属富集量,比较不同城市河段铜锈环棱螺受污染程度的基础上,通过计算每周/每月摄入量和目标危害系数(THQ、TTHQ),参照 FAO/WHO 食品添加剂联合专家委员会(JECFA)提出的暂定每周/每月耐受摄入量(PTWI),对湘江铜锈环棱螺的膳食风险进行评估,旨在为湘江流域居民铜锈环棱螺的消费安全提供参考.

1 研究区域概况

湘江是长江七大支流之一,干流全长 856 km,其中湖南境内长 670 km,流域面积 94660 km²,沿途由南向北流经湖南 18 个县市区汇入洞庭湖,是湖南省工业生产、农业灌溉和居民生活的主要水源^[4]. 湖南境内湘江流域面积占全省总面积的 40%,人口约占全省人口的 60%,是湖南省工业化水平最高、城市化发展最快的区域,也是湖南经济社会发展的重要命脉^[18]. 湘江流域号称“有色金属之乡”,在有色金属矿产资源的开发利用过程中,为湘江流域生态环境打下了重金属复合污染的深远烙印. 此外,湖南省冶金、化工、建材、轻工、食品加工、机械等行业大多分布在湘江流域,特别在衡阳、株洲、湘潭 3 个主要工业城市尤为集中. 湘江流域处于亚热带季风气候,年均温度 17~18℃,年均降雨量 1000~1700 mm,其中 60%~70% 的降雨集中在 4-9 月^[4,19].

2 材料与方法

2.1 样品采集

样品采集于 2015 年 12 月. 沿湘江干流主要城市:永州(S1、S2、S3)、衡阳(S4、S5、S6);株洲(S7、S8、S9);湘潭(S10、S11、S12)、长沙(S13、S14、S15)和岳阳(S16、S17)共设置 17 个采样断面,其中除岳阳仅设置

湘阴城区和湘阴下游断面外,其他各城市均分设城市上游、城区和下游 3 个断面(图 1). 每个采样断面随机选择 5 个铜锈环棱螺放入带有少量河水的冰盒中. 活体带回实验室,放入超纯水中暂养 24 h,使螺排空胃肠内容物后,用毛刷清洗干净保存于 -20°C 冰箱中冻存备用.

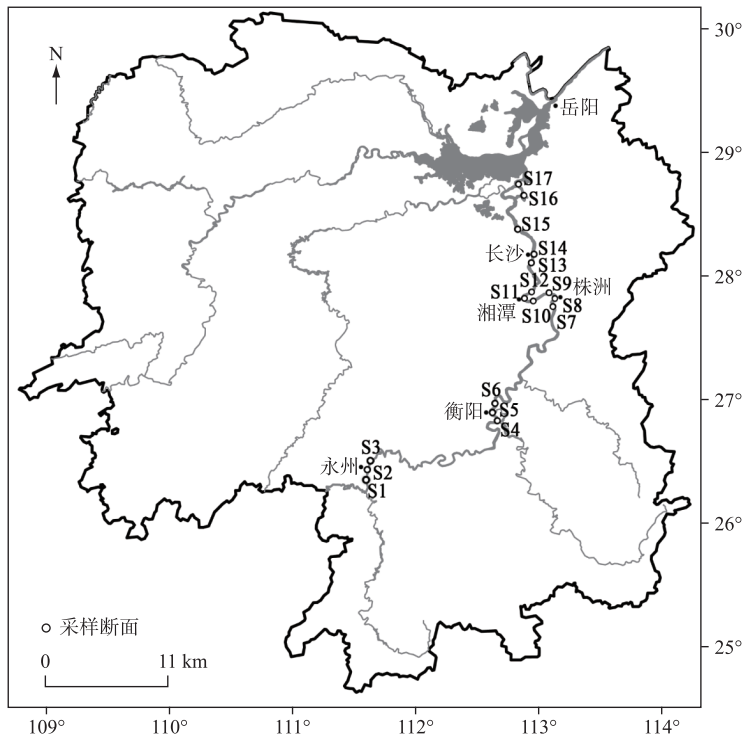


图 1 湘江采样断面设置

Fig.1 Sampling sites in the Xiangjiang River

2.2 样品测定

测量样品的壳高、壳宽和湿重后,将其解剖,分离腹足和内脏团,再分别称取壳重、腹足重、内脏团重. 准确称量 0.25 g 腹足和 0.50 g 内脏团分别放入聚四氟乙烯烧杯(100 ml,江苏多氟龙防腐技术有限公司)中,加入 12 ml 浓硝酸,置于微控数显电热板(EH45A Plus,北京莱伯泰科仪器股份有限公司)上 95°C 恒温加热 2 h,冷却至室温后,再加入 4 ml 30% 过氧化氢溶液加热 30 min,冷却后用超纯水定容至 50 ml,摇匀,待测. 重金属 As、Cd、Pb、Cu、Zn、Cr 的测定采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, 7900, 安捷伦,美国)进行.

实验室所用聚四氟乙烯烧杯、容量瓶、烧杯、玻璃棒、移液管等均用 20% 硝酸溶液浸泡 24 h 以上,用水反复冲洗,置于超声波清洗仪清洗,最后用去离子水冲洗干净,以去除容器壁上的可溶性重金属离子. 样品检测采用严格的质量控制,包括全程使用空白样品消除试剂和溶解的影响和采用标准物质(鲍鱼 GBW-10024, 购买于国家标准物质中心)来验证数据的精确性和准确性. 标准物质的回收率范围为 91%~105%^[11].

2.3 评价方法及标准

2.3.1 污染程度评价 铜锈环棱螺的重金属污染程度运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 种污染物的实测值; C_{si} 为第 i 种污染物的标准值. 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; $0.6 < P_i < 1.0$ 时为中度污染水平; $P_i \geq 1.0$ 时为重污染水平. 标准值采用《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762-2017)^[20] 中 As、Cd、Pb、Cr 的限量值(分别为 0.5、2.0、1.0、2.0 mg/kg), 以及《无公害食品水产品中有毒有害物质限量》(NY 5073-2006)^[21] 中 Cu 的限

量值(50 mg/kg). Zn 标准值目前国家尚无相关规定.

2.3.2 膳食风险评估 因腹足是螺的主要食用部分,因此本研究中膳食风险评估仅针对腹足部分. 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 值作比较,综合评定食用环棱螺的膳食风险. 计算方法为:

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

式中, DI 为每周/每月摄入量; C 为重金属元素的富集量,mg/kg; M 为每人每天摄食环棱螺的量,g/d; BW 为人的体重; N 为摄食天数. 参考2002年总膳食调查和文献资料,消费人群为成年人,其体重取值为60 kg,环棱螺的日消费量取20 g,元素的富集量分别取其算术平均值和最高富集量,其中Cd为每月摄入量与PTWI值作比较,As、Cu、Zn为每周摄入量与PTWI值作比较.

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的健康风险(THQ)和多种重金属复合暴露的健康风险($TTHQ$). $THQ < 1$ 表示没有任何风险,反之,摄食人群将面临健康风险. THQ 、 $TTHQ$ 计算参考高蜜等^[22]对海产品的健康风险分析方法,公式为:

$$THQ = (C \cdot FIR \cdot EF \cdot ED) / (RfDo \cdot BW \cdot AT) \quad (3)$$

$$TTHQ = \sum_{i=0}^n THQ_i \quad (4)$$

式中, C 为铜锈环棱螺重金属富集量,mg/kg; FIR 为食量大小(20 g/d); EF 为人群暴露频率(365 d/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为0.3、1、3.5、40、300、3.0 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ^[23]; BW 为体重(60 kg); AT 为暴露量分摊时间:365 d \times 暴露年数(70年).

2.4 数据统计与分析

数据分别采用 Excel 2013 和 SPSS 21.0 软件进行统计和分析,并以平均值 \pm 标准误表示. 不同江段间腹足或内脏团之间以及同一江段腹足与内脏团之间重金属富集量差异采用单因素方差分析(One-Way ANOVA),差异显著时($P < 0.05$)采用 Duncan 法进行多重比较. 采用相关分析评价腹足或内脏团湿重对其重金属富集量的影响.

3 结果与讨论

3.1 铜锈环棱螺形态参数

在测定的铜锈环棱螺6个形态参数中,永州采集的样品均显著低于株洲、湘潭、长沙和岳阳样品,且其壳宽、腹足湿重和内脏团湿重也显著低于衡阳样品($P < 0.05$),但其壳高、螺湿重和空壳重与衡阳样品之间没有显著差异($P > 0.05$)(表1). 相关性分析表明,除腹足湿重分别与其Cu和As富集量存在弱相关性外($P = 0.02 \sim 0.03$),腹足或内脏团湿重与其重金属富集量之间均不存在显著的相关性($P > 0.05$),说明个体大小对铜锈环棱螺腹足和内脏团重金属富集量不存在显著影响.

表1 湘江铜锈环棱螺形态参数*

Tab.1 Morphological parameters of *Bellamya aeruginosa* in the Xiangjiang River

地点	样品数	壳高/mm	壳宽/mm	螺湿重/g	空壳重/g	腹足湿重/g	内脏团湿重/g
永州	15	20.79 \pm 1.29 ^a	13.66 \pm 0.60 ^a	2.37 \pm 0.40 ^a	1.15 \pm 0.18 ^a	0.33 \pm 0.06 ^a	0.46 \pm 0.09 ^a
衡阳	15	23.98 \pm 0.49 ^a	15.81 \pm 0.33 ^b	3.12 \pm 0.16 ^a	1.53 \pm 0.08 ^a	0.40 \pm 0.03 ^b	0.70 \pm 0.05 ^b
株洲	15	25.95 \pm 0.51 ^b	17.57 \pm 0.26 ^b	4.55 \pm 0.19 ^b	2.45 \pm 0.12 ^b	0.51 \pm 0.03 ^b	0.95 \pm 0.08 ^b
湘潭	15	24.93 \pm 0.51 ^b	16.10 \pm 0.30 ^b	3.50 \pm 0.18 ^b	1.73 \pm 0.12 ^b	0.44 \pm 0.04 ^b	0.75 \pm 0.06 ^b
长沙	15	25.60 \pm 0.72 ^b	15.93 \pm 0.41 ^b	3.87 \pm 0.27 ^b	2.13 \pm 0.19 ^b	0.51 \pm 0.04 ^b	0.79 \pm 0.06 ^b
岳阳	10	27.70 \pm 0.63 ^b	16.84 \pm 0.29 ^b	4.16 \pm 0.21 ^b	2.23 \pm 0.14 ^b	0.51 \pm 0.06 ^b	0.87 \pm 0.06 ^b

* 同列数据上标不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$).

3.2 铜锈环棱螺重金属富集量

铜锈环棱螺腹足重金属As、Cd、Pb、Cu和Zn富集量范围分别为0.51~1.66、0.06~6.03、0.32~2.27、

6.46~30.72 和 48.81~96.08 mg/kg; Cr 在所有样品腹足中均未检出. 此外, Pb 在永州上、中、下游 3 个断面腹足样品中也均未检出. 所有江段, 腹足的 As 富集量均超过污染物限定标准; 株洲江段腹足的 Cd 和岳阳江段腹足的 Pb 富集量均超过相应的污染物限定标准. 所有江段腹足的 Cu 富集量均未超过污染物限定标准 (图 2).

铜锈环棱螺内脏团重金属 As、Cd、Pb、Cu、Zn 和 Cr 富集量分别为 1.01~38.04、1.42~4.85、0.38~7.25、21.87~58.36、145.22~202.43 和 0.05~2.15 mg/kg. 所有江段内脏团的 As 富集量均超过相应的污染物限定标准; 除长沙外, 其他江段内脏团的 Cd 富集量均超过相应的污染物限定标准; 除长沙和永州江段外, 其他江段内脏团的 Pb 富集量均超过相应的污染物限定标准; 长沙和岳阳江段内脏团的 Cu 富集量及衡阳江段内脏团的 Cr 富集量均超出相应的限定标准 (图 2).

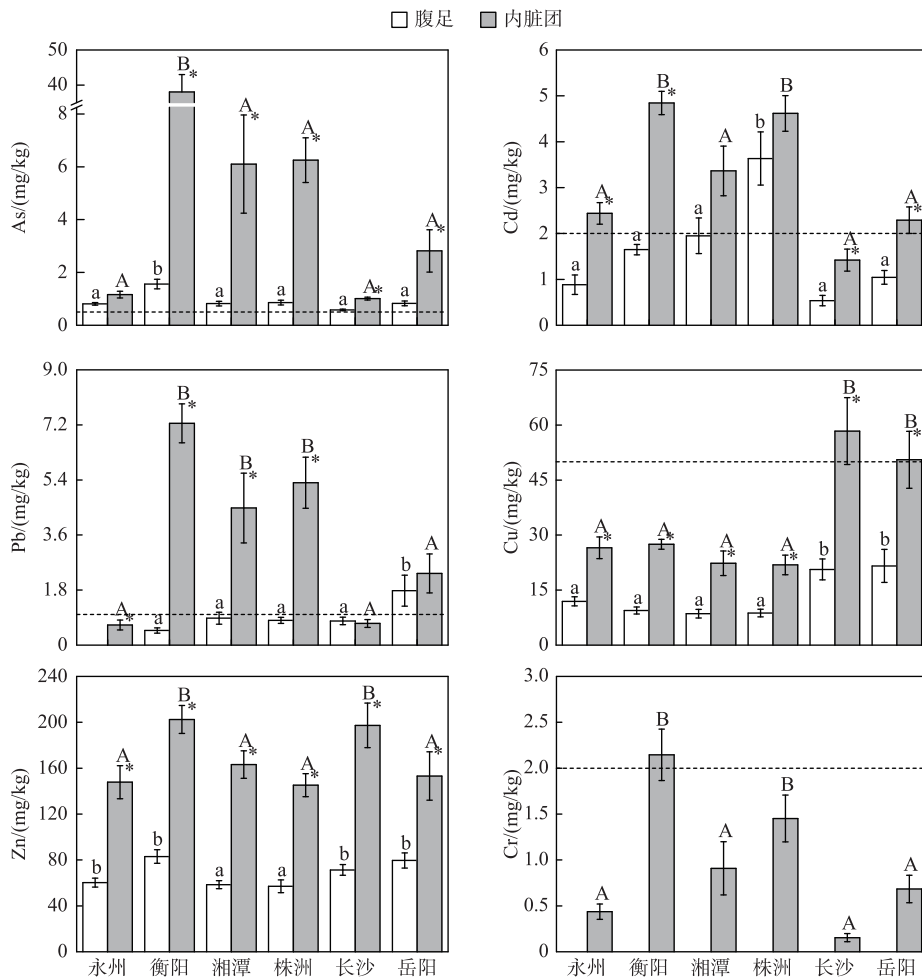


图 2 湘江铜锈环棱螺腹足和内脏团的重金属富集量 (虚线表示国家食品中重金属限量标准; 不同小写或大写字母分别表示不同江段腹足或内脏团重金属富集量差异显著; * 表示同一江段腹足和内脏团重金属富集量差异显著 ($P < 0.05$))

Fig.2 Heavy metals bioaccumulation in foot and visceral mass of *Bellamya aeruginosa* in the Xiangjiang River (The dashed line indicates National Food Safety Standard maximum levels of contaminants in foods; Different lower- or upper-case letters indicate significant differences between cities for foot or visceral mass; * indicates significant differences between foot and visceral mass for each city ($P < 0.05$))

所有江段铜锈环棱螺腹足和内脏团的 As 富集量均超过相应的限定标准,其中衡阳江段显著高于其他江段($P<0.05$). 衡阳和株洲江段内脏团的 Cd、Pb、Cr 富集量均显著高于其他江段($P<0.05$),长沙江段内脏团的 Cu 和 Zn 富集量及岳阳江段的 Cu 富集量也分别显著高于其他江段($P<0.05$). 研究结果显示,东洞庭湖方形环棱螺软组织(腹足+内脏团)As、Cd、Pb 和 Hg 的平均富集量分别为 0.34、0.09、0.12 和 0.01 mg/kg,均低于国家《无公害食品 水产品中有毒有害物质限量》(NY5073—2006)标准和人体消费标准^[13]. 因此,本研究再次证实湘江铜锈环棱螺腹足或内脏团的 As、Cd 和 Pb 的富集量总体上均高于东洞庭湖方形环棱螺^[11]. 湘江铜锈环棱螺腹足(可食部分)的 As、Cd、Pb、Cu、Zn 和 Cr 富集量均低于其支流浏阳河的方格短沟蜆(*Semisulcospira cancellata*)和河蚬(*Corbicula fluminea*),As、Cu、Zn 和 Cr 富集量也低于浏阳河中华沼螺(*Parafossarulus eximius*)、福寿螺(*Pomacea canaliculata*)和背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*). 此外,湘江铜锈环棱螺腹足 6 种金属的富集量低于汉江而高于长江(Cu 和 Cr 除外). 与太湖铜锈环棱螺相比,湘江铜锈环棱螺的 Cd 富集量较高(表 2).

所有江段铜锈环棱螺内脏团的 Cu、Zn 和 Cr 富集量均显著高于腹足($P<0.05$,图 2). 除永州外,其他江段铜锈环棱螺内脏团的 As 富集量均显著高于腹足,永州、衡阳、长沙和岳阳铜锈环棱螺内脏团的 Cd 富集量显著高于腹足,永州、衡阳、湘潭和株洲江段内脏团的 Pb 富集量显著高于腹足($P<0.05$,图 2). 研究表明,金属积累速率和金属储存具有组织特异性,中肠腺或肝胰腺通常是腹足动物体内积累金属的主要器官^[25],本研究结果进一步证实内脏团是湘江铜锈环棱螺的主要富集部位^[11].

表 2 不同水域软体动物重金属平均富集量(mg/kg,湿重)

Tab.2 Heavy metals bioaccumulation (mg/kg, wet weight) in different mollusks from different water areas

水域	种类	分析部位	As	Cd	Pb	Cu	Zn	Cr
湘江	铜锈环棱螺	腹足	0.92	1.65	0.90	13.01	67.62	—
		内脏团	9.61	3.21	3.75	33.58	169.05	1.23
湘江 ^[11]	铜锈环棱螺	腹足+内脏团	6.18	2.82	3.06	28.07	136.20	0.80
洞庭湖 ^[13]	方形环棱螺	腹足+内脏团	0.34	0.09	0.12	—	—	—
浏阳河 ^[24]	中华沼螺	可食部分	7.18	0.99	2.70	273.43	460.10	2.78
浏阳河 ^[24]	方格短沟蜆	可食部分	12.81	1.99	4.10	104.37	138.03	7.79
浏阳河 ^[24]	福寿螺	可食部分	5.58	0.37	0.61	221.65	73.99	1.11
浏阳河 ^[24]	河蚬	可食部分	8.29	3.59	5.88	91.10	279.32	12.86
浏阳河 ^[24]	背角无齿蚌	可食部分	13.97	0.95	5.82	25.99	581.30	2.88
长江 ^[14]	铜锈环棱螺	肌肉	—	0.08	0.85	13.93	39.78	1.56
汉江 ^[15]	铜锈环棱螺	腹足	3.16	3.00	11.30	25.45	172.29	—
太湖 ^[17]	铜锈环棱螺	腹足+内脏团	—	0.54	2.86	48.95	140.26	3.96
太湖 ^[17]	河蚬	腹足+内脏团	—	3.89	1.93	113.05	243.16	4.85

3.3 重金属污染程度评价

铜锈环棱螺腹足 As、Cd、Pb 和 Cu 的超标率分别为 87.06%、27.06%、24.72% 和 2.35%,其他元素均未超标. 依据单因子污染指数法评价,85.88% 样品的 As 富集量处于重污染水平,其他处于中度污染水平. 27.26%样品的 Cd 富集量处于重污染水平,30.59%处于中度污染水平,20%处于轻度污染水平. 4.72%样品的 Pb 富集量处于重污染水平,22.35%处于中度污染水平,25.88%处于轻度污染水平. 2.35%样品的 Cu 富集量处于重污染水平,2.35%处于中度污染水平,48.78%处于轻度污染水平,其他样品处于未污染水平(图 3).

铜锈环棱螺内脏团的 As、Cd、Pb、Cu、Cr 超标率分别为 100%、71.76%、65.88%、14.12%和 75.8%. 所有样品的 As 富集量均处于重污染水平. 71.76% 样品的 Cd 富集量处于重污染水平,8.23% 处于中度污染水平,20% 处于轻度污染水平. 56% 样品的 Pb 富集量处于重污染水平,7.06%处于中度污染水平,12.94%处于轻度污染水平. 15.29% 样品的 Cu 富集量处于重污染水平,22.35% 处于中度污染水平,57.65% 处于轻度污染水平,其他处于未污染水平. 23.33% 样品的 Cr 富集量处于重污染水平,20%处于中度污染水平,33.87%处于轻度污染水平(图 3).

所有江段铜锈环棱螺腹足和内脏团均受到一定程度的重金属污染, As 污染水平最重, 其次是 Cd 和 Pb. 衡阳、株洲和湘潭江段样品受 As、Cd、Pb、Cr 污染最为严重, 而长沙、岳阳样品受 Cu 污染最为严重, 这可能与各个地市工业产业类型和布局不同有关. 已有的研究显示, 长江下游铜锈环棱螺存在 Cr 和 Pb 污染^[14], 太湖铜锈环棱螺存在 Cd 污染^[17], 而湘江铜锈环棱螺 As、Cd、Pb、Cu、Cr 均存在一定程度的污染, 这表明湘江铜锈环棱螺重金属污染的种类较长江和太湖多, 同时也进一步证实湘江处于复合重金属污染状态^[11,26-27].

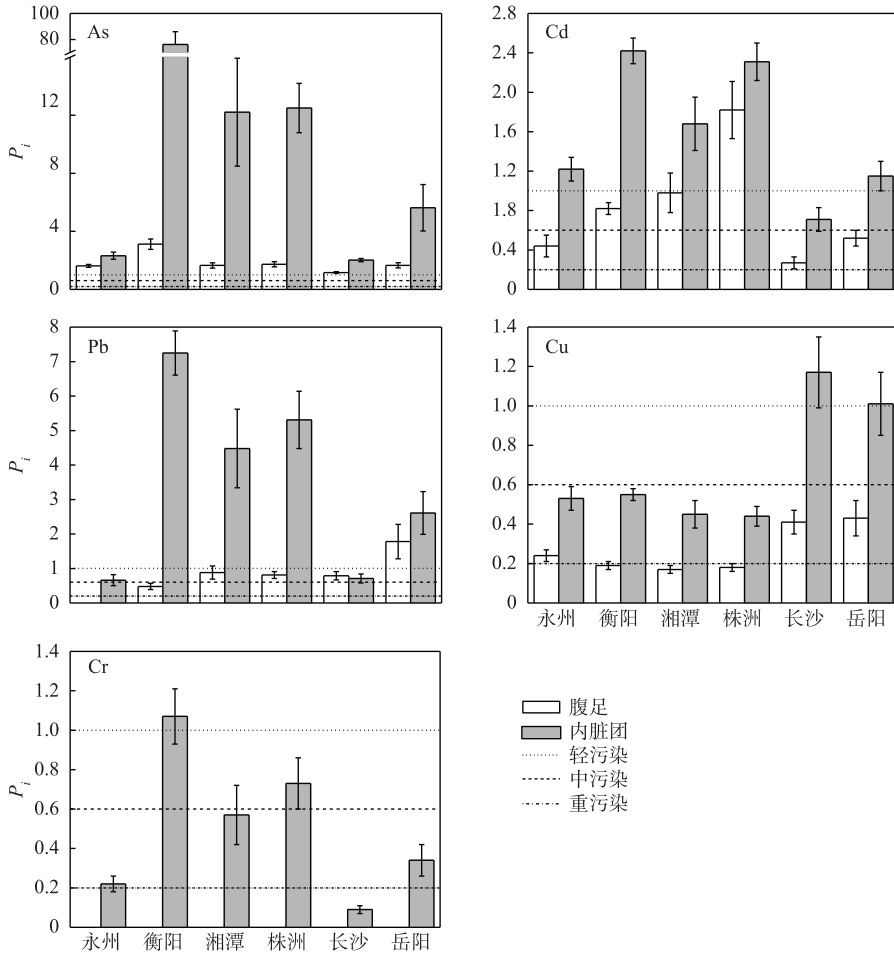


图3 湘江铜锈环棱螺的重金属污染指数

Fig.3 Heavy metal pollution index of *Bellamyia aeruginosa* in the Xiangjiang River

3.4 膳食风险评估

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^[28]. 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, 对生物毒性极强^[29], 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^[30]. Cr 是人体必需的微量元素之一, 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^[31], 但本研究所有江段铜锈环棱螺腹足中均未检测到 Cr. 将成人对湘江铜锈环棱螺重金属的每周摄入量与参考值 PTWI 进行比较, 株洲成人每月 Cd 摄入量均值已超过参考值 (0.025 mg/kg), 且其最大值更是参考值的 3.44 倍, 永州、湘潭地区的成人每月 Cd 摄入量的最大值也超过相应的参考值, 而所有江段成人食用铜锈环棱螺的 As、Cu、Zn 每周摄入量均值和最高值都低于各参考值 (表 3). JECFA 未确定可有效保护健康的 Pb 暴露量阈值, 但人体摄

入过量的 Pb 会引起中枢神经系统损伤、贫血等疾病^[32],建议尽可能降低 Pb 的暴露。

表 3 成人对湘江铜锈环棱螺重金属的每周/每月摄入量(mg/kg)

Tab.3 Adult weekly/monthly intake of heavy metals from *Bellamya aeruginosa* along the Xiangjiang River

金属	摄入量	永州	衡阳	湘潭	株洲	长沙	岳阳	PTWI
As	平均	0.002	0.004	0.002	0.002	0.001	0.002	0.015
	最大	0.003	0.008	0.004	0.004	0.002	0.003	
Cd	平均	0.008	0.016	0.018	0.034	0.010	0.010	0.025
	最大	0.029	0.022	0.042	0.086	0.013	0.017	
Cu	平均	0.030	0.020	0.020	0.020	0.050	0.050	3.5
	最大	0.048	0.038	0.043	0.034	0.120	0.125	
Zn	平均	0.140	0.190	0.140	0.130	0.170	0.190	7
	最大	0.200	0.303	0.197	0.295	0.277	0.272	

对于单一重金属 Cd、Pb、Cu、Zn 的目标危害系数,摄入湘江铜锈环棱螺的 *THQ* 值均远小于 1(表 4),表明上述单一重金属的摄入均低于参考值。但对于 As 来说,衡阳江段成人食用铜锈环棱螺后的 *THQ* 大于 1,且其他江段 *THQ* 值都接近于 1,表明湘江 As 摄入量存在较大的潜在健康风险。比较 6 个江段混合重金属潜在风险顺序为:衡阳>岳阳>株洲>湘潭>永州>长沙。除长沙江段的 *TTHQ* 值略低于 1 外,其他河段均大于 1,表明除长沙河段外,其他各江段的成人食用当地铜锈环棱螺后均存在健康风险,且衡阳江段最为严重。

表 4 居民食用湘江铜锈环棱螺的目标危害系数

Tab.4 Target hazard quotients for resident's consumption of *Bellamya aeruginosa* along the Xiangjiang River

地区	As	Cd	Pb	Cu	Zn	<i>TTHQ</i>
永州	0.902	0.001	0.0003	0.013	0.069	1.076
衡阳	1.737	0.002	0.0024	0.012	0.095	1.968
湘潭	0.913	0.002	0.0015	0.010	0.074	1.150
株洲	0.957	0.003	0.0018	0.010	0.067	1.201
长沙	0.646	0.001	0.0002	0.026	0.090	0.978
岳阳	0.924	0.001	0.0009	0.024	0.078	1.372

4 结论

湘江湖南段 6 个城市江段铜锈环棱螺均受到一定程度的污染,其中衡阳、湘潭和株洲江段较为严重,且各江段铜锈环棱螺内脏团重金属富集量整体上均高于腹足,当地居民长期食用后存在潜在的健康风险,因此建议相关部门制定湘江铜锈环棱螺摄入标准,控制食用量和食用频率,引导居民减少污染物的摄入风险。此外,鉴于湘江铜锈环棱螺具有分布广、移动能力较弱、重金属富集能力强、容易采集和鉴定等环境指示物种的典型特征,故可进一步探索其作为环境指示物种在湘江重金属污染现状监测和综合治理效果评价项目中的功能和应用。

5 参考文献

[1] Lei M, Qing PF, Tie BQ. Current situation and analysis of heavy metal pollution in Hunan Xiangjiang river basin. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2010, (2): 62-65. [雷鸣,秦普丰,铁柏清. 湖南湘江流域重金属污染的现状与分析. 农业资源与环境学报, 2010, (2): 62-65.]

[2] Xiang YB, Zhang Y, Yuan KG *et al.* Comprehensive evaluation and feature analysis of developmental level of county territory in Xiangjiang river basin. *Economic Geography*, 2011, 31(7): 1088-1093. [向云波,张勇,袁开国等. 湘江流域县域发展水平的综合评价及特征分析. 经济地理, 2011, 31(7): 1088-1093.]

[3] Xu YZ, Liu JJ, Cheng YX *et al.* Heavy metal pollution characteristics and ecological risk assessment of sediment in

- Xiangjiang river. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(1): 189-198. [许友泽, 刘锦军, 成应向等. 湘江底泥重金属污染特征与生态风险评价. 环境化学, 2016, **35**(1): 189-198.]
- [4] Zeng X, Liu Y, You S *et al.* Spatial distribution, health risk assessment and statistical source identification of the trace elements in surface water from the Xiangjiang River, China. *Environmental Science & Pollution Research*, 2015, **22**(12): 9400-9412.
- [5] Liu J, Xu Y, Cheng Y *et al.* Occurrence and risk assessment of heavy metals in sediments of the Xiangjiang River, China. *Environmental Science & Pollution Research*, 2017, **24**(3): 1-13.
- [6] Zhang Q, Wang FM, Luo YP *et al.* The community structure of large benthos in Xiangjiang River basin and its relationship with environmental factors. *Journal of Hydroecology*, 2018, (2): 48-57. [张琦, 王方鸣, 罗岳平等. 湘江流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系. 水生态学杂志, 2018, (2): 48-57.]
- [7] Liu J. Study on the diversity of molluscs in Xiangjiang River [Dissertation]. Changsha: Hunan Normal University, 2006. [刘俊. 湘江软体动物多样性研究[学位论文]. 长沙: 湖南师范大学, 2006.]
- [8] Cai YJ, Gong ZJ, Qin BQ. The community structure and diversity of macrobenthos in Taihu lake. *Biodiversity Science*, 2010, **18**(1): 50-59. [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. 生物多样性, 2010, **18**(1): 50-59.]
- [9] Duan XJ. Study on the feeding habits and food choices of *Bellamyia purificata* (Heude) in ecological ditch [Dissertation]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013. [段晓姣. 生态沟渠中梨形环棱螺的食性及食物选择的研究[学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2013.]
- [10] Ma TW, Zhou K, Zhu C *et al.* The biomarker of chronic stress of cadmium-contaminated sediments was responded to by *Bellamyia aeruginosa*. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(8): 1750-1756. [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. 环境科学学报, 2009, **29**(8): 1750-1756.]
- [11] Li D, Pi J, Zhang T *et al.* Evaluating a 5-year metal contamination remediation and the biomonitoring potential of a freshwater gastropod along the Xiangjiang River, China. *Environmental Science & Pollution Research*, 2018, **25**: 21127-21137.
- [12] Liu FY, Wu YL. Accumulation and detoxification mechanism of heavy metal pollutants in marine organisms. *Marine Science*, 1988, **12**(5): 63-66. [刘发义, 吴玉霖. 重金属污染物在海洋生物体内的积累和解毒机理. 海洋科学, 1988, **12**(5): 63-66.]
- [13] Zhu YL, Jiang JH, Huang Q *et al.* Distribution and correlation of Cd, Pb, Hg, As in sediments and organisms of Dongting Lake and Datong Lake. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, **27**(4): 1377-1384. [祝云龙, 姜加虎, 黄群等. 洞庭湖与大通湖水体沉积物和生物体中 Cd Pb Hg As 的含量分布及相互关系. 农业环境科学学报, 2008, **27**(4): 1377-1384.]
- [14] Song C, Zhang C, Meng SL *et al.* Heavy metal accumulation and risk assessment of *Bellamyia aeruginosa* in the lower reaches of Yangtze River. *Chinese Fishery Quality and Standards*, 2016, **6**(4): 6-11. [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. 中国渔业质量与标准, 2016, **6**(4): 6-11.]
- [15] Gao BF, He L, Zhang Z *et al.* Indicative function of *Bellamyia aeruginosa* in the middle and lower stream of Hanjiang River. *Hubei Agricultural Sciences*, 2011, **50**(1): 128-131. [高宝峰, 何力, 张征等. 铜锈环棱螺对汉江中下游重金属污染的指示作用. 湖北农业科学, 2011, **50**(1): 128-131.]
- [16] Bo L, Wang D, Li T *et al.* Accumulation and risk assessment of heavy metals in water, sediments, and aquatic organisms in rural rivers in the Taihu Lake region, China. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2015, **22**(9): 6721.
- [17] Kong M, Hang X, Wang L *et al.* Accumulation and risk assessment of heavy metals in sediments and zoobenthos (*Bellamyia aeruginosa* and *Corbicula fluminea*) from Lake Taihu. *Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2016, **73**(1): 203.
- [18] Li J, Peng F, Ding D *et al.* Characteristics of the phytoplankton community and bioaccumulation of heavy metals during algal blooms in Xiangjiang River (Hunan, China). *Science China Life Sciences*, 2011, **54**(10): 931-938.
- [19] Mao L, Mo D, Guo Y *et al.* Multivariate analysis of heavy metals in surface sediments from lower reaches of the Xiangjiang River, southern China. *Environmental Earth Sciences*, 2013, **69**(3): 765-771.
- [20] National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China & China Food and Drug Administration ed. GB2762-2017 National Food Safety Standard Maximum Levels of Contaminants in Foods. Beijing: Standards Press of

- China, 2017. [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. 北京: 中国标准出版社, 2017.]
- [21] Ministry of Health of the People's Republic of China ed. NY5073—2006 Limit of toxic and harmful substances in non-hazardous food and aquatic products. Beijing: Standards Press of China, 2006. [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. 北京: 中国标准出版社, 2006.]
- [22] Gao M, Wu X, Paul LK *et al.* Heavy metal content and health risk analysis of Huludao seafood. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(1): 205-211. [高蜜, 吴星, Paul L. Klerks 等. 葫芦岛海产品重金属含量及健康风险分析. 生态学杂志, 2016, **35**(1): 205-211.]
- [23] Guo LC, Zeng EY. Broadening the global reach of the United States Environmental Protection Agency (USEPA) is vital to combating globalized environmental problems. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(18): 6911-6913.
- [24] Jia Y, Wang L, Qu Z *et al.* Distribution, contamination and accumulation of heavy metals in water, sediments, and freshwater shellfish from Liuyang River, Southern China. *Environmental Science & Pollution Research*, 2017, **25**(1/2): 1-9.
- [25] Benito D, Niederwanger M, Izagirre U *et al.* Successive onset of molecular, cellular and tissue-specific responses in midgut gland of *Littorina littorea* exposed to sub-lethal cadmium concentrations. *International Journal of Molecular Sciences*, 2017, **18**(8): 1815.
- [26] Zeng X, Liu Y, You S *et al.* Spatial distribution, health risk assessment and statistical source identification of the trace elements in surface water from the Xiangjiang River, China. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2015, **22**(12): 9400-9412.
- [27] Liu J, Xu Y, Cheng Y *et al.* Occurrence and risk assessment of heavy metals in sediments of the Xiangjiang River, China. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2017, **24**(3): 1-13.
- [28] Chang XX, Wen CH. Heavy metal pollution and human health. *Environmental Science Survey*, 2000, **19**(1): 59-61. [常学秀, 文传浩. 重金属污染与人体健康. 环境科学导刊, 2000, **19**(1): 59-61.]
- [29] Du LN, Yu RZ, Wang HY *et al.* Research progress on heavy metal cadmium pollution and its toxicity. *Journal of Environment and Health*, 2013, **30**(2): 167-174. [杜丽娜, 余若祯, 王海燕等. 重金属镉污染及其毒性研究进展. 环境与健康杂志, 2013, **30**(2): 167-174.]
- [30] Deng X, Wen LL, Chi XS. Research progress on the health hazards and prevention of cadmium. *China Healthcare Innovation*, 2010, **5**(10): 4-5. [邓新, 温璐璐, 迟鑫姝. 镉对人体健康危害及防治研究进展. 中国医疗前沿, 2010, **5**(10): 4-5.]
- [31] Zhang C, Song C, Qiu LP *et al.* The content and risk assessment of heavy metal chromium of fish in Taihu Lake. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(7): 1254-1260. [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. 农业环境科学学报, 2015, **34**(7): 1254-1260.]
- [32] Fan P. Effects of heavy metals on human health. *Pla Health*, 2004, (1): 40. [范鹏. 重金属对人体健康的影响. 解放军健康, 2004, (1): 40.]