

张旭, 冉景丞, 杨卫诚, 等. 贵州草海小龙虾体内重金属富集与环境的关系 [J]. 福建农业学报, 2019, 34 (2): 247-254.
ZHANG X, RAN J C, YANG W C, et al. Heavy Metal Accumulation in Caohai Crayfish in Relation to Environmental Conditions [J].
Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2019, 34 (2): 247-254.

贵州草海小龙虾体内重金属富集与环境的关系

张旭¹, 冉景丞^{2*}, 杨卫诚^{1,3}, 陶红梅^{1,3}, 姜连^{1,3}

(1. 贵州师范大学生命科学学院, 贵州 贵阳 550000; 2. 贵州省林业厅, 贵州 贵阳 550000;
3. 贵州师范大学喀斯特洞穴研究中心, 贵州 贵阳 550000)

摘要:【目的】探究贵州草海小龙虾不同部位重金属的富集情况及其与其生活环境间的关系,为小龙虾的安全健康养殖和水体重金属污染状况的科学评估提供依据。【方法】采集草海不同样地的水样、底泥和小龙虾样品,并对草海小龙虾进行不同浓度重金属 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 室内富集试验,运用原子吸收法测定小龙虾不同部位 Cu、Cd、Pb、Zn、Hg 等 5 种重金属的含量,采用 Pearson 相关性分析、方差分析对小龙虾不同部位重金属富集情况与样地环境进行分析。【结果】5 种重金属元素在小龙虾样品、底泥和水样中均有检出,检出率 100%,5 种重金属在小龙虾不同部位含量由大到小均呈现出内脏>虾壳>虾肉的规律;Pearson 相关性分析结果表明小龙虾样品中的 Cd、Pb、Zn 含量与底泥中的相应元素具有显著正相关,与水样具有一定相关性但相关性不显著;室内不同浓度重金属 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 富集试验显示,随着重金属离子的浓度增高,小龙虾内脏中的重金属含量升高,虾壳、虾肉、螯肢变化不明显。【结论】小龙虾不同部位对重金属的富集能力不同,小龙虾体内重金属含量的高低与环境重金属含量密切相关。

关键词: 贵州; 草海; 小龙虾; 重金属; 相关性

中图分类号: S 971

文献标识码: A

文章编号: 1008-0384 (2019) 02-247-08

Heavy Metal Accumulation in Caohai Crayfish in Relation to Environmental Conditions

ZHANG Xu¹, RAN Jing-cheng^{2*}, YANG Wei-cheng^{1,3}, TAO Hong-mei^{1,3}, JIANG Lian^{1,3}

(1. School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550000, China;

2. The Forestry Department of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550000, China;

3. Karst Cave Research Center, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550000, China)

Abstract: 【Objective】 Heavy metal accumulations in organs of crayfish at Caohai Lake in Guizhou were measured to determine the effect of environmental pollution, providing reference for the healthy cultivation of crayfish and scientific evaluation on the heavy metal contamination. 【Method】 Samples of water, sediment and crayfish were collected from various locations on the lake for heavy metal determination. An experiment of live crayfish cultivated under enriched Cu^{2+} and Cd^{2+} conditions was conducted in the laboratory to generate a simulated heavy metal transfer model. The contents of Cu, Cd, Pb, Zn and Hg in the collected soil and crayfish samples as well as in the various organs of the cultivated crayfish were determined by atomic absorption spectrometry. Pearson correlation analysis and variance analysis were applied to analyze the data. 【Result】 All 5 heavy metals were detected in the crayfish, sediment and water samples from the lake. The metal contents in the crayfish organs differed in the order of viscera > shell > meat. The Pearson correlation analysis showed that Cd, Pb and Zn in the sampled crayfish significantly correlated with those in the sampled sediment, but not the water samples. The heavy metal concentration in the viscera, but not in the shell, meat or claw, of the crayfish raised in the lab increased with increasing heavy metal addition to the water. 【Conclusion】 The contamination of heavy metals in crayfish closely related to the conditions of the lake in which it lived. And, the heavy metal contents varied in different organs of the shellfish.

Key words: Guizhou; Caohai Lake; crayfish; heavy metals; correlation

收稿日期: 2018-12-28 初稿; 2019-01-24 修改稿

作者简介: 张旭 (1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 湿地生态学 (E-mail: 395001854@qq.com)

* 通讯作者: 冉景丞 (1968-), 男, 研究员, 研究方向: 喀斯特环境野生动植物保护 (E-mail: Rjc68cn@126.com)

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30560024); 贵州省科技基金项目 (黔科合 LH 字 LKS [2016] 7207 号、黔科合支撑 [2017] 2811 号、黔科合重大专项字 [2016] 3022-03 号)

0 引言

【研究意义】克氏原螯虾 *Procambarus clarkii*, 俗称小龙虾, 隶属于节肢动物门 Arthropoda, 甲壳纲 Crustacea, 十足目 Orgerdecapoda, 螯虾科 Cambaridae, 原螯虾属 *Procambarus*。其原产于北美洲的美国南部和墨西哥北部, 20 世纪 30 年代经日本引入到我国南京^[1]。目前, 长江中下游地区是我国淡水小龙虾的主产区^[2]。小龙虾具有繁殖能力强、生命周期短、生长快、生态幅宽、食性杂等生物学特征, 具备 r-型生长特征^[3-6], 因此在我国的大部分野生水域和稻田等人工湿地中广泛繁殖。近年来, 随着环境污染的加剧, 大量重金属污染物被排入江河湖泊中, 导致水质恶化现象严重。水生动物能将水体中浓度很低的重金属离子在短期富集于体内, 通过食物链威胁人类的安全与健康^[7-9]。【前人研究进展】国内外专家研究发现, 克氏原螯虾对重金属有很强的富集特性, 其体内重金属污染物浓度可能是周围环境的数倍, 在克氏原螯虾生长环境中, 重金属遍布于土壤、水和空气, 虾体不可避免地会受到重金属污染^[10-13]。赵白等^[14]在对缙云县克氏原螯虾 5 种重金属富集特征性的研究表明, 克氏原螯虾的不同组织对不同重金属的积累具有高度的选择性。朱玉芳等^[10]对苏州地区克氏原螯虾体内重金属分布规律的研究结果显示, 铜、镉有不同程度的污染, 且肌肉的残留量低于鳃、肝、螯足肌肉。【本研究切入点】近年来, 我国在小龙虾重金属富集的诸多方面取得了一定的进展, 但在研究小龙虾重金属富集情况的同时, 对采样水体连同底泥沉积物中的重金属含量进行同步测定的研究相对较少^[15]。因此, 本文在研究草海自然水域小龙虾对 5 种重金属富集的同时, 也首次对草海小龙虾重金属富集和环境间关系进行研究。【拟解决的关键问题】采集草海湖区 8 个样地的水样、底泥和 4 个样地的小龙虾样品, 测定其中铜、镉、铅、锌、汞 5 种重金属元素的含量, 并对小龙虾在不同浓度重金属 Cu 和 Cd 富集情况下进行室内培养试验, 以期探明草海小龙虾体内 5 种重金属元素含量与样地底泥和水样重金属含量之间的关系以及小龙虾不同部位对 Cu 和 Cd 富集的差异, 为今后的研究工作奠定基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

草海自然保护区位于贵州省威宁县城西南侧,

地处北纬 26°49′~26°53′, 东经 104°12′~104°18′, 是云贵高原东部最大的淡水湖泊, 因水草丰茂而得名^[16-17]。草海属温带气候, 年平均温度 10.5℃, 年平均降水量 950 mm, 平均相对湿度 79%。海拔 2 170~2 527 m, 湖区面积 24.59 hm², 水域面积 20.98 km², 湖区水深 2.4~5.0 m。草海水体偏碱性 (pH 平均值为 8.0), 水源补给主要是雨水, 其次是地下水。干湿季分明, 干季为 11 月至翌年 4 月, 湿季为 5~10 月^[18]。草海生物资源丰富, 有生物物种 1 941 种, 鸟类 228 种, 以黑颈鹤为代表的珍稀鸟类多达 10 余万只, 其中黑颈鹤 2 200 余只; 水生植物涵盖沉水植物、挺水植物、浮叶植物、漂浮植物 4 个类型, 覆盖度达 80% 以上。因此, 草海素有“鸟的天堂”、“水下森林”、“物种基因库”和“露天博物馆”的美誉。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与制备 在草海湖区自然水域布设江家湾 (A)、西海码头 (B)、刘家巷 (C)、喽啰山 (D)、胡叶林 (E)、郑家营万下组 (F)、阳关山 (G)、吴家岩头 (H) 8 个样点。在 8 个样点内采集水样、底泥和小龙虾样品, 按照《GB/T 12998-1991 水质采样技术指导》要求进行采样^[19], 用 200 mL 聚乙烯采样试管采集各样地的水样; 用彼得逊采泥器采集各样地底泥, 采集的底泥样品放入无菌聚乙烯塑封袋中, 置于背阴通风处自然晾干, 用玛瑙研钵将底泥磨碎后过 100 目筛, 放入塑封袋中待测; 小龙虾样品采集使用捕虾地笼捕获, 将捕获的小龙虾带到实验室用蒸馏水洗净后迅速将虾壳、内脏、虾肉解剖分离, 解剖的样品搅碎后放入 50℃ 的烘箱中烘干, 样品烘干后放入塑封袋中待测; 室内重金属培养试验的小龙虾通过捕虾地笼捕获后带到实验室用清水养殖 4 d。

1.2.2 小龙虾室内重金属培养试验 在待测的 5 种重金属中, 既包含大量元素也包括微量元素, 由于实验室空间有限, 无法满足所有待测重金属的室内培养试验, 因此选取大量重金属元素铜和微量重金属元素镉进行小龙虾室内重金属富集试验。根据《渔业水质标准 GB 11607-89》^[20]中规定的限值: $Cu \leq 0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $Cd \leq 0.005 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 《污水综合排放标准 GB 8978-1996》^[21]关于重金属铜和镉的含量标准分别为 $Cu \leq 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $Cd \leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的规定设计试验。其中, Cu 的暴露质量浓度分别为 0、0.5、1.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; Cd 的暴露质量浓度分别为 0、0.05、0.10 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

(1) 重金属 Cu^{2+} 的富集试验: 将 360 只经过

实验室水族箱 (100 cm×50 cm×50 cm) 饲养 4 d 的健康 (无断触角、断螯、断步足和游泳足) 的小龙虾分别放入 9 个聚乙烯透明水箱中, 将 9 个水箱进行标号, 其中 1~3 号水箱为一组 (水体 Cu²⁺ 质量浓度为 0 mg·L⁻¹, 对照)、4~6 号水箱为一组 (水体 Cu²⁺ 质量浓度为 0.5 mg·L⁻¹)、7~9 号水箱为一组 (水体 Cu²⁺ 质量浓度为 1.0 mg·L⁻¹)。饲养水源为充分曝气 48 h 的自来水, 水体 pH 为 (7.3±0.6), 水温为 (24.2±2.3)°C, 自然光照; 为减少饲料对克氏原螯虾富集重金属的影响, 选择低目标重金属含量饲料作为克氏原螯虾的食物。从重金属富集的第 0 d 起, 每隔 4 d 从水箱中取 2 只小龙虾 (每组共 6 只), 将虾壳、虾肉、内脏、螯肢分离搅碎后放入 50°C 的烘箱中烘干, 样品烘干后放入塑封袋中待测。

(2) 重金属 Cd²⁺ 的富集试验: 重金属 Cd²⁺ 的富集试验过程同上, 1~3 号水箱为一组 (水体 Cd²⁺ 质量浓度为 0 mg·L⁻¹, 对照)、4~6 号水箱为一组 (水体 Cd²⁺ 质量浓度为 0.05 mg·L⁻¹)、7~9 号水箱为一组 (水体 Cd²⁺ 质量浓度为 0.1 mg·L⁻¹)。

1.2.3 样品前处理

(1) 样品消解: 称取 0.500 0 g 经过处理的小龙虾各部位的样品放入 100 mL 锥形瓶中, 加入 6

mL 硝酸, 2 mL 过氧化氢, 加盖过夜; 称取 0.200 g 经过研磨的底泥放入消解罐中, 依次加入 5 mL 硝酸、6 mL 氢氟酸、1 mL 高氯酸, 加盖放入高压消解釜置于 142°C 烘箱中消解 10.5 h。

(2) 赶酸定容: 将放置过夜和消解过的小龙样品和底泥放到 140°C 的石墨电热板上进行赶酸, 待容器中剩 1 mL 左右溶液后将其从电热板上拿下, 冷却后加入 10 mL 4% 的硝酸溶液, 用蒸馏水定容到 50 mL 容量瓶中, 同时做样品空白。

1.2.4 重金属含量的测定 运用原子吸收和原子荧光仪器测定小龙虾不同部位样品、样地水样、底泥样品中的铜、镉、铅、锌、汞的含量和室内试验所制取样品中重金属的含量。

1.3 数据处理

运用 SPSS 20.0 统计软件进行方差分析和 Pearson 相关分析。

2 结果与分析

2.1 不同部位小龙虾样品重金属富集差异

所布设的 8 个样地中, 只有江家湾、西海码头、吴家岩头和喽啰山 4 个样地捕获到小龙虾。4 个样地小龙虾不同部位对 5 种重金属的富集情况如表 1 所示。

表 1 小龙虾不同部位重金属含量

Table 1 Heavy metal contents in different organs of crayfish from Lake Caohai

| 样地 Site | 铜 Cu/(mg·kg ⁻¹) | | | 镉 Cd/(mg·kg ⁻¹) | | | 铅 Pb/(mg·kg ⁻¹) | | |
|------------------|-----------------------------|-------------------|---------------|-----------------------------|-------------------|---------------|-----------------------------|-------------------|---------------|
| | 虾壳 Shrimp shell | 虾肉 Shrimp meat | 内脏 Viscera | 虾壳 Shrimp shell | 虾肉 Shrimp meat | 内脏 Viscera | 虾壳 Shrimp shell | 虾肉 Shrimp meat | 内脏 Viscera |
| 江家湾 Jiangjianwan | 15.41±0.12 | 4.58±0.21 | 10.64±0.17 | 0.17±0.03 | 0.10±0.04 | 0.78±0.32 | 1.20±0.11 | 0.74±0.35 | 2.24±0.07 |
| 西海码头 Xihaimatou | 21.39±0.19 | 8.62±0.36 | 32.30±0.32 | 0.16±0.05 | 0.13±0.02 | 1.01±0.15 | 1.63±0.26 | 0.65±0.16 | 3.79±0.13 |
| 吴家岩头 Wujiyantou | 15.66±0.27 | 5.43±0.21 | 29.37±0.19 | 0.52±0.33 | 0.04±0.01 | 1.06±0.28 | 0.75±0.35 | 0.34±0.25 | 1.05±0.29 |
| 喽啰山 Louluoshan | 12.10±0.36 | 3.11±0.31 | 19.40±0.28 | 0.18±0.07 | 0.10±0.05 | 0.61±0.22 | 0.71±0.39 | 0.30±0.05 | 0.99±0.38 |
| 平均 Average | 16.14±0.21 | 5.44±0.25 | 22.93±0.17 | 0.26±0.05 | 0.09±0.01 | 0.87±0.28 | 1.07±0.21 | 0.51±0.26 | 2.02±0.29 |

| 样地 Site | 锌 Zn/(mg·kg ⁻¹) | | | 汞 Hg/(mg·kg ⁻¹) | | |
|-----------------|-----------------------------|-------------------|---------------|-----------------------------|-------------------|---------------|
| | 虾壳 Shrimp shell | 虾肉 Shrimp meat | 内脏 Viscera | 虾壳 Shrimp shell | 虾肉 Shrimp meat | 内脏 Viscera |
| 江家湾 Jiangjiawan | 74.45±0.37 | 31.89±0.42 | 103.00±0.39 | 0.06±0.03 | 0.01±0.00 | 0.21±0.04 |
| 西海码头 Xihaimatou | 63.48±0.43 | 31.18±0.24 | 110.20±0.21 | 0.03±0.01 | 0.02±0.01 | 0.06±0.02 |
| 吴家岩头 Wujiyantou | 75.72±0.33 | 36.94±0.25 | 132.60±0.32 | 0.05±0.04 | 0.03±0.01 | 0.12±0.02 |
| 喽啰山 Louluoshan | 75.61±0.21 | 38.90±0.26 | 134.30±0.18 | 0.05±0.01 | 0.02±0.00 | 0.11±0.05 |
| 平均 Average | 72.32±0.35 | 34.73±0.31 | 120.03±0.25 | 0.05±0.02 | 0.02±0.01 | 0.13±0.02 |

可以看出,4 个样地小龙虾样品中对 Cu、Cd、Pb、Zn、Hg 重金属元素均有检出,检出率达到 100%,小龙虾样品不同部位对 5 种重金属富集的规律均为:内脏>虾壳>虾肉。根据《GB/T 18406. 4-2001 农产品质量安全 无公害水产品安全要求》^[22]中对有毒、有害物质的限量要求:铜 $\leq 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、镉 $\leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、铅 $\leq 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、汞 $\leq 0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (该标准中并未提及锌的限量值),4 个样地小龙虾样本中,Cu、Hg 重金属元素均在标准范围内,而除了吴家岩头虾肉的 Cd、吴家岩头和喽啰山虾肉的 Pb,均已超出标准范围,说明草海小龙虾已不同程度受到重金属 Cd 和 Pb 的污染。

2.2 不同样地水体和底泥的重金属含量

表 2 为各样地底泥和水样的 5 种重金属的含

量。根据《渔业水质标准 GB 11607-89》中规定的水质限定值:铜 $\leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、镉 $\leq 0.005 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、铅 $\leq 0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、锌 $\leq 0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、汞 $\leq 0.000 05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,8 个样地水中的 5 种重金属含量均小于渔业水质标准中规定的标准值,说明草海各样地水质情况良好,并未受到重金属的污染。根据《GB/T 18407. 4-2001 农产品质量安全无公害水产品产地环境要求》^[23]中养殖区域底质重金属含量的要求:铜 $\leq 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、镉 $\leq 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、铅 $\leq 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、锌 $\leq 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、汞 $\leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,8 个样地中 Cd、Zn 和西海码头的 Hg 含量均已超出标准值,其他元素均在标准范围内,但江家湾和西海码头的 Pb 含量已经接近标准值,含量相对其他样地较高。

表 2 水样和底泥重金属含量
Table 2 Heavy metals in water and sediment samples from Lake Caohai

| 样地 Site | 水样 Water/ $(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$ | | | | |
|-------------------|---|-----------|------------|-------------|-----------|
| | 铜 Cu | 镉 Cd | 铅 Pb | 锌 Zn | 汞 Hg |
| 江家湾 Jiangjiawan | 6.90±0.18 | 0.05±0.00 | 3.80±0.11 | 5.50±0.27 | 0.04±0.00 |
| 西海码头 Xihaimatou | 0.10±0.04 | 0.05±0.00 | 11.20±0.15 | 5.60±0.42 | 0.04±0.00 |
| 刘家巷 Liujiaxiang | 0.80±0.13 | 0.05±0.00 | 8.10±0.25 | 8.00±0 | 0.04±0.00 |
| 喽啰山 Louluoshan | 1.10±0.32 | 0.05±0.00 | 16.10±0.43 | 5.60±0.33 | 0.04±0.00 |
| 胡叶林 Huyelin | 0.90±0.30 | 0.05±0.00 | 5.10±0.18 | 2.30±0.08 | 0.04±0.00 |
| 万下 Wanxia | 0.80±0.36 | 0.05±0.00 | 5.20±0.41 | 2.10±0.17 | 0.04±0.00 |
| 阳关山 Yangguanshan | 0.70±0.00 | 0.05±0.00 | 3.30±0.34 | 8.80±0.16 | 0.04±0.00 |
| 吴家岩头 Wujianyantou | 0.70±0.40 | 0.05±0.00 | 4.40±0.16 | 5.70±0.33 | 0.04±0.00 |
| 平均 Average | 1.50±0.22 | 0.05±0.00 | 7.20±0.04 | 5.50±0.36 | 0.04±0.00 |
| 样地 Site | 底泥 Sediment/ $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ | | | | |
| | 铜 Cu | 镉 Cd | 铅 Pb | 锌 Zn | 汞 Hg |
| 江家湾 Jiangjiawan | 16.95±0.23 | 1.32±0.24 | 39.75±0.33 | 127.60±0.31 | 0.07±0.01 |
| 西海码头 Xihaimatou | 21.60±0.26 | 2.35±0.43 | 48.56±0.22 | 123.60±0.41 | 0.22±0.09 |
| 刘家巷 Liujiaxiang | 17.13±0.25 | 0.99±0.25 | 12.62±0.35 | 135.40±0.27 | 0.02±0.01 |
| 喽啰山 Louluoshan | 3.00±0.42 | 1.88±0.38 | 13.70±0.26 | 135.80±0.31 | 0.02±0.00 |
| 胡叶林 Huyelin | 19.42±0.42 | 3.03±0.43 | 15.53±0.27 | 173.70±0.33 | 0.02±0.00 |
| 万下 Wanxia | 16.82±0.31 | 4.34±0.38 | 13.05±0.21 | 148.70±0.37 | 0.01±0.00 |
| 阳关山 Yangguanshan | 19.01±0.18 | 1.10±0.45 | 21.25±0.26 | 117.10±0.35 | 0.07±0.01 |
| 吴家岩头 Wujianyantou | 18.24±0.42 | 2.84±0.15 | 11.68±0.35 | 136.40±0.41 | 0.09±0.03 |
| 平均 Average | 16.52±0.27 | 2.23±0.28 | 22.02±0.42 | 137.29±0.36 | 0.07±0.02 |

2.3 小龙虾样品与养殖环境中重金属含量的相关性分析

小龙虾样品中重金属含量与环境重金属含量的相关性见表 3。由于 8 个样地水样中 Cd 和 Hg 的检测含量较低(分别为 0.05 和 $0.04 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$),所以相关性分析的结果均显示为“—”。

2.3.1 虾样与底泥的关系

Pearson 相关性分析结果表明小龙虾样品中的 Cd、Pb、Zn 含量与底泥中的相应重金属含量呈显著正相关,相关系数分别为 0.840、0.973 和 0.978,虾样中 Cd 含量与底泥中 Cu 含量呈显著正相关,相关系数为 0.951,虾样中 Pb、Zn 含量与底泥中 Zn、Pb 含量呈显著负

相关，相关系数为-0.988、-0.986。已有研究表明，小龙虾在不同混合浓度重金属水体条件下对重金属的富集会出现协同或拮抗富集效应^[24]，上述两种富集效应可能是导致本部分小龙虾体内 Cd 含量与底泥中 Cu 含量呈显著正相关，而虾样中 Pb、Zn 含量与底泥中 Zn、Pb 含量呈显著负相关的原因。小龙虾样品中的 Cu (0.752) 和 Hg (-0.651) 与底泥中相应重金属含量没有显著相关性。

2.3.2 虾样与水体的关系 小龙虾样品中重金属与水样的 Pearson 相关性分析表明，小龙虾样品与水样具有一定相关性，但不显著。

2.4 小龙虾室内重金属富集试验

小龙虾不同部位在不同浓度重金属试验水体中富集试验的结果如表 4 所示。可以看出：(1)在 3 个不同重金属浓度的试验组中，小龙虾对重金属 Cu 和 Cd 的富集含量均呈现出随重金属浓度增加而增加的趋势，偶尔也会出现低浓度试验水体中小龙虾

不同部位重金属含量比高浓度试验水体中相应部位含量高的情况，这可能是由于小龙虾对不同浓度重金属的富集速率不同以及富集尚未达到饱和状态的原因造成的。(2)在对照组中(A)无论是虾壳、虾肉、内脏和螯肢中重金属 Cu 和 Cd 的含量变化并不明显，基本维持原有重金属含量，但是各部位重金属含量存在差异，表现为：内脏>虾壳>螯肢>虾肉；当试验水体重金属浓度增加时，小龙虾体内 2 种重金属含量增加，但是虾壳、虾肉和螯肢随着富集天数的增加含量变化并不明显，内脏随着富集天数的增加含量也明显增加。(3)显著性分析表明，3 种试验水体中小龙虾对重金属 Cu($F=1.068, P>0.05$)和 Cd($F=1.706, P>0.05$)的富集均不具有显著性，小龙虾不同部位在 3 种试验水体中仅内脏对重金属 Cu($F=6.121, P<0.05$)和 Cd($F=4.308, P<0.05$)的富集具有显著差异性，说明小龙虾内脏对重金属 Cu 和 Cd 的富集含量变化更明显。

表 3 小龙虾样品重金属含量与水样、底泥的 Pearson 相关分析

Table 3 Pearson correlation analysis between heavy metal contents of crayfish and water and sediment samples from Lake Caohai

| | | 底泥 Sediment | | | | | 水样 Water | | | | |
|-------------|----|-------------|--------|---------|---------|--------|----------|--------|--------|--------|------|
| | | 铜 Cu | 镉 Cd | 铅 Pb | 锌 Zn | 汞 Hg | 铜 Cu | 镉 Cd | 铅 Pb | 锌 Zn | 汞 Hg |
| 虾样 Crayfish | Cu | 0.752 | 0.766 | 0.304 | -0.362 | 0.877 | - | -0.725 | 0.056 | 0.657 | - |
| | Cd | 0.951* | 0.840* | -0.122 | 0.093 | 0.456 | - | -0.398 | -0.555 | 0.798 | - |
| | Pb | -0.077 | -0.148 | 0.973* | -0.986* | 0.857 | - | 0.079 | -0.062 | -0.304 | - |
| | Zn | 0.246 | 0.375 | -0.988* | 0.978* | -0.684 | - | -0.401 | 0.278 | 0.517 | - |
| | Hg | -0.433 | -0.589 | -0.161 | 0.226 | -0.651 | - | 0.883 | -0.619 | -0.517 | - |

注：* 表示在 0.05 级别(双尾)，相关性显著。

Note: * means the correlation is significant at 0.05 level (double tail).

表 4 小龙虾对不同质量浓度重金属的富集情况

Table 4 Heavy metal contents in crayfish as related to heavy metal concentrations in cultivation water in laboratory

| 重金属种类 Heavy metal | 体积比 Volume ratio | 部位 Part | 富集天数 Accumulation days | | | | | |
|--------------------------|---------------------|-----------------|------------------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| | | | 0 d | 4 d | 8 d | 12 d | 16 d | 20 d |
| 铜 Cu | 对照(CK) | 虾壳 Shrimp shell | 22.14±0.23 | 24.05±0.18 | 20.76±0.43 | 9.23±0.33 | 9.09±0.21 | 13.95±0.08 |
| | | 虾肉 Shrimp meat | 7.86±0.25 | 9.94±0.38 | 6.13±0.24 | 8.39±0.17 | 7.64±0.16 | 7.92±0.32 |
| | | 内脏 Viscera | 51.26±0.11 | 52.34±0.19 | 52.16±0.12 | 51.95±0.29 | 55.34±0.34 | 57.14±0.27 |
| | | 螯肢 Shrimp claw | 11.06±0.18 | 12.67±0.41 | 12.99±0.35 | 8.97±0.27 | 11.15±0.14 | 11.32±0.26 |
| 0.5 mL · L ⁻¹ | | 虾壳 Shrimp shell | 17.27±0.33 | 20.69±0.25 | 22.07±0.17 | 22.63±0.35 | 24.39±0.23 | 28.95±0.30 |
| | | 虾肉 Shrimp meat | 7.06±0.30 | 8.02±0.21 | 8.55±0.09 | 9.28±0.27 | 13.79±0.19 | 16.77±0.34 |
| | | 内脏 Viscera | 55.97±0.25 | 53.71±0.18 | 60.55±0.20 | 62.56±0.47 | 68.03±0.36 | 141.1±0.33 |
| | | 螯肢 Shrimp claw | 8.91±0.22 | 9.21±0.46 | 9.00±0.34 | 15.28±0.17 | 12.32±0.25 | 15.62±0.11 |
| 1.0 mL · L ⁻¹ | | 虾壳 Shrimp shell | 21.48±0.43 | 20.18±0.26 | 23.62±0.19 | 24.43±0.41 | 25.91±0.35 | 26.05±0.21 |
| | | 虾肉 Shrimp meat | 8.86±0.21 | 6.50±0.19 | 11.86±0.36 | 13.80±0.22 | 14.61±0.20 | 18.25±0.38 |
| | | 内脏 Viscera | 54.76±0.40 | 70.29±0.21 | 79.8±0.06 | 94.91±0.37 | 105.4±0.32 | 115.10±0.19 |
| | | 螯肢 Shrimp claw | 9.12±0.24 | 9.81±0.31 | 13.48±0.36 | 12.38±0.12 | 12.38±0.20 | 26.81±0.24 |

(续上表)

| 重金属种类 Heavy metal | 体积比 Volume ratio | 部位 Part | 富集天数 Accumulation days | | | | | |
|----------------------|-------------------------|-----------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| | | | 0 d | 4 d | 8 d | 12 d | 16 d | 20 d |
| 镉 Cd | 对照(CK) | 虾壳 Shrimp shell | 0.06±0.01 | 0.09±0.00 | 0.03±0.01 | 0.10±0.02 | 0.04±0.02 | 0.05±0.00 |
| | | 虾肉 Shrimp meat | 0.02±0.00 | 0.04±0.01 | 0.03±0.01 | 0.05±0.00 | 0.02±0.00 | 0.03±0.00 |
| | | 内脏 Viscera | 1.69±0.25 | 1.55±0.36 | 1.63±0.26 | 1.60±0.47 | 1.25±0.30 | 1.48±0.26 |
| | | 螯肢 Shrimp claw | 0.07±0.02 | 0.06±0.02 | 0.07±0.00 | 0.12±0.05 | 0.02±0.00 | 0.03±0.00 |
| | 0.05 mL·L ⁻¹ | 虾壳 Shrimp shell | 0.02±0.01 | 0.02±0.01 | 0.06±0.01 | 0.07±0.00 | 0.11±0.06 | 0.18±0.03 |
| | | 虾肉 Shrimp meat | 0.08±0.01 | 0.09±0.03 | 0.10±0.01 | 0.12±0.04 | 0.14±0.02 | 0.17±0.03 |
| | | 内脏 Viscera | 1.56±0.29 | 2.02±0.49 | 2.00±0.37 | 4.23±0.46 | 6.01±0.30 | 7.52±0.16 |
| | | 螯肢 Shrimp claw | 0.02±0.00 | 0.06±0.01 | 0.07±0.01 | 0.08±0.02 | 0.09±0.00 | 0.17±0.02 |
| | 0.1 mL·L ⁻¹ | 虾壳 Shrimp shell | 0.03±0.01 | 0.04±0.01 | 0.04±0.01 | 0.09±0.01 | 0.16±0.02 | 0.21±0.08 |
| | | 虾肉 Shrimp meat | 0.08±0.00 | 0.08±0.02 | 0.09±0.02 | 0.14±0.00 | 0.16±0.03 | 0.25±0.07 |
| | | 内脏 Viscera | 1.60±0.49 | 1.80±0.41 | 4.77±0.16 | 8.15±0.35 | 9.47±0.26 | 10.99±0.11 |
| | | 螯肢 Shrimp claw | 0.03±0.01 | 0.04±0.01 | 0.08±0.01 | 0.15±0.04 | 0.19±0.00 | 0.23±0.06 |

3 讨论与结论

重金属污染物在环境中转移时,有时可以通过食物链经生物浓缩和生物放大作用,将重金属污染物在生物体内富集^[25]。小龙虾因其底栖的生活方式和所处生态位,使其成为一种较为理想的生物指示物,成为环境污染监测、评价和治理的重要辅助工具^[26]。

本研究结果表明,小龙虾不同组织对重金属的富集具有明显的差异性,多种重金属元素都主要富集在小龙虾的内脏。由于生物组织的组成、功能和活跃情况差异,对重金属元素的利用、代谢、耐受和富集也不同,因此表现为重金属元素在生物体内的分布不均一,其原因可能是因为水生生物主要通过鳃进行氧气交换以及过滤食物中的杂质,水和食物中的重金属被鳃吸收后通过血液进入动物的内脏中并逐渐累积,导致内脏中重金属含量要大于其他部位。

对草海小龙虾、水体和底泥中 5 种重金属进行检测,通过 Pearson 相关性分析结果表明,虾样中重金属含量与底泥中重金属含量具有显著的相关性,与水样具有相关性但并不显著,王书莉^[27]的研究结果也表明,小龙虾体内重金属含量与其生活环境中水体和土壤具有显著相关性,与本文研究结果一致。水体和底泥中 5 种重金属检测的结果显示,底泥中 5 种重金属含量要远高于水样中的含量。已有研究表明,湿地植物可以吸收水体和底泥中的重金属并通过枯落物的分解和矿化将其归还到底泥中^[28],河流、湖泊等湿地中 99% 以上的重金

属都富集在底泥中,底泥既是污染物的汇,也是污染物的源^[29-30]。由于草海水体中植物覆盖度高,涵盖了沉水、挺水和浮水等众多植物种类,水体和底泥中的污染物通过枯落物的分解和矿化作用将重金属积累到底泥中,这可能是造成底泥中重金属含量要远高于水样中的原因。

室内重金属富集试验结果表明,随重金属浓度增加,小龙虾对重金属的富集也出现增加的趋势,重金属主要累积在小龙虾的内脏,显著性分析结果也表明内脏在不同重金属浓度水体中对重金属的富集具有差异性,这与张振燕等^[24]对小龙虾重金属富集的研究结果一致。水生动物的生命活动与其生活的环境息息相关,作为水生底栖动物的小龙虾可以通过呼吸作用和食物链将环境中的重金属污染物累积到体内,并随环境中重金属浓度的变化而改变。

综上所述,重金属主要富集在小龙虾的内脏,小龙虾体内重金属含量与水体和底泥中重金属含量具有相关性,且随着环境中重金属含量的增加,其体内富集的重金属含量也会随之增高。

参考文献:

- [1] 曹志芳,熊娟,熊国勇,等.鄱阳湖区克氏原螯虾外部形态的解剖特征[J].江西水产科技,2014(2):10-14.
CAO Z F, XIONG J, XIONG G Y, et al. Anatomical characteristics of the external morphology of Crayfish in Poyang Lake area [J]. Jiangxi Fishery Science and Technology, 2014 (2): 10-14. (in Chinese)
- [2] 王华全,沈伊亮.湖北出口淡水小龙虾重金属污染监测与分析[J].湖北农业科学,2014,53(9):2140-2142,2145.

- WANG H Q, SHEN Y L. Monitoring and analysis of heavy metal pollution of *Crayfish* exported from Hubei province [J]. *Hubei Agricultural Science*, 2014, 53 (9): 2140—2142, 2145. (in Chinese)
- [3] 唐鑫生. 克氏原螯虾 [J]. 生物学通报, 2001 (9): 19—20.
TANG X S. *Procambarusclarkii* [J]. *Biological Bulletin*, 2001 (9): 19—20. (in Chinese)
- [4] 唐建清, 宋胜磊, 潘建林, 等. 克氏原螯虾对几种人工洞穴的选择性 [J]. 水产科学, 2004 (5): 26—28.
TANG J Q, SONG S L, PAN J L, et al. The selectivity of several artificial caves in primordial *Crayfish* [J]. *Fisheries Science*, 2004 (5): 26—28. (in Chinese)
- [5] REYONLD J D, HOLDCH D M. Growth and Biologyreoduction of freshwater *Cayflsh* [M]. Oxford, UK: Blackwell Science, 2002: 152—191.
- [6] GHERARDL F. *Crayfish* Invading Europe: The case study of *Procambarusclarkii* [J]. *Marine and Freshwater Behaviour and Phystology*, 2006, 39 (3): 175—191.
- [7] 孙振中, 林惠山, 姚根娣, 等. 重金属等若干污染因子对克氏原螯虾的影响 [J]. 水产科技情报, 1995 (3): 107—110.
SUN Z Z, LIN H S, YAO G D, et al. Effects of heavy metals and other pollution factors on *Procamaeusclarkii* [J]. *Aquatic Science and Technology Information*, 1995 (3): 107—110. (in Chinese)
- [8] 龚路军, 舒新亚, 熊邦喜, 等. 重金属对克氏原螯虾的影响及其对策 [J]. 水利渔业, 2007 (5): 17—20.
GONG L J, SHU X Y, XIONG B X, et al. Effects of heavy metals on *Crayfish* and its countermeasures [J]. *Water Fisheries*, 2007 (5): 17—20. (in Chinese)
- [9] 章海风, 陆红梅, 路新国. 食品中重金属污染现状及防治对策 [J]. 中国食物与营养, 2010 (8): 17—19.
ZHANG H F, LU H M, LU X G. Current situation of heavy metal pollution in food and its control countermeasures [J]. *Chinese Food and Nutrition*, 2010 (8): 17—19. (in Chinese)
- [10] 朱玉芳, 崔勇华, 戈志强, 等. 重金属元素在克氏原螯虾体内的生物富集作用 [J]. 水利渔业, 2003 (1): 11—12.
ZHU Y F, CUI Y H, GE Z Q, et al. Biological enrichment of heavy metal elements in *Procamaeusclarkii* [J]. *Water Fisheries*, 2003 (1): 11—12. (in Chinese)
- [11] 周立志, 陈春玲, 张磊, 等. 三种重金属在克氏原螯虾体内的富集特征 [J]. 生态学杂志, 2008 (9): 1498—1502.
ZHOU L Z, CHEN C L, ZHANG L, et al. Enrichment of three heavy metals in *Procamaeusclarkii* [J]. *Journal of Ecology*, 2008 (9): 1498—1502. (in Chinese)
- [12] 黄霞. 安徽地区克氏原螯虾及其水体五种重金属污染评价 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2009.
HUANG X. Pollution assessment of five heavy metals in *Procamaeusclarkii* and its waters in Anhui Province [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- [13] ADEYMO, KUDIR A T. Bioconcentration of lend in the tissues of feral and laboratory exposed *Clariasgariepinus* [J]. *J Med Sci*, 2008, 8 (3): 281—286.
- [14] 赵白, 姜川, 田晓宇, 等. 缙云县克氏原螯虾对5种重金属富集特征性的研究 [J]. 丽水学院学报, 2010, 32(2): 16—18.
ZHAO B, JIANG C, TIAN X Y, et al. Study on the enrichment characteristics of 5 heavy metals in *Crayfish* from Jinyun County [J]. *Journal of Lishui University*, 2010, 32 (2): 16—18. (in Chinese)
- [15] 张萌, 朱春潮, 汪雁, 等. 克氏原螯虾重金属富集的研究进展 [J]. 南昌大学学报 (医学版), 2016, 56 (2): 80—87.
ZHANG M, ZHU C C, WANG Y, et al. Advances in Heavy Metal Enrichment in *Crayfish* [J]. *Journal of Nanchang University (Medical Edition)*, 2016, 56 (2): 80—87. (in Chinese)
- [16] 蔡国俊. 草海喀斯特高原湿地水体富营养化与水生植物关系研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.
CAI G J. Study on the relationship between water eutrophication and aquatic plants in karst plateau [D]. Guiyang: Guizhou University, 2016. (in Chinese)
- [17] 蔡京兰, 熊源新, 张宇敏. 草海自然保护区的藻类植物与水体富营养化关系初探 [J]. 贵州林业科技, 1996 (2): 22—24, 39.
CAI J L, XIONG Y X, ZHANG Y M. A preliminary study on the relationship between algae and eutrophication in Caohai nature reserve [J]. *Guizhou Forestry Technology*, 1996 (2): 22—24, 39. (in Chinese)
- [18] 黎杨, 夏品华, 葛皓, 等. 高原湖泊湿地草海沉积物胞外酶与有机碳的时空动态 [J]. 中国环境科学, 2017, 37 (7): 2723—2730.
LI Y, XIA P H, GE H, et al. Temporal and spatial dynamics of extracellular enzymes and organic carbon in caohai sediments of plateau lakes and wetlands [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37 (7): 2723—2730. (in Chinese)
- [19] 中华人民共和国环境保护局. 水质采样技术指导: GB/T 12998-1991 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
Environmental Protection Agency, the People's Republic of China. Water quality-Guidance on sampling techniques: GB/T 12998-1991 [S]. Beijing: China Standards Press, 1992. (in Chinese)
- [20] 中华人民共和国环境保护局. 渔业水质标准: GB 11607-89 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1990.
Environmental Protection Agency, the People's Republic of China. Water quality STANDARD for fisheries: GB 11607-89 [S]. Beijing: China Standards Press, 1990. (in Chinese)
- [21] 中华人民共和国环境保护局. 污水综合排放标准: GB 8978-1996 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
Environmental Protection Agency, the People's Republic of China. Integrated wastewater discharge standard: GB 8978-1996 [S]. Beijing: China Standards Press, 1998. (in Chinese)
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 农产品质量安全无公害水产品安全要求: GB/T 18406. 4-2001 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, the People's Republic of China. Safety

- qualification for agricultural product-Safety requirements for non-environmental pollution aquatic products: GB/T 18406. 4-2001 [S]. Beijing: China Standards Press, 2001. (in Chinese)
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 农产品质量安全无公害水产品产地环境要求: GB/T 18407. 4-2001 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, the People's Republic of China. Safety qualification for agricultural product-Environmental requirements for origin of non-environmental pollution aquatic products: GB/T 18407. 4-2001 [S]. Beijing: China Standards Press, 2001. (in Chinese)
- [24] 张振燕. 重金属在克氏原螯虾体内吸收与蓄积特性及蓄积过程重金属间相互作用的研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2013.
- ZHANG Z Y. Study on the absorption and accumulation characteristics of heavy metals and the interaction between heavy metals in *Procamaeusclarkii* [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2013. (in Chinese)
- [25] 李学鹏. 重金属在双壳贝类体内的生物富集动力学及净化技术的初步研究 [D]. 杭州: 浙江工商大学, 2008.
- LI X P. Preliminary study on bioenrichment kinetics and purification techniques of heavy metals in *Bivalves* [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2008. (in Chinese)
- [26] LOUREIRO S, SOARES AMVM. Terrestrial avoidance tests as screening tool to assess soil contamination [J]. *Environmental pollution*, 2005, 138: 121-131.
- [27] 王书莉. Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 浓度对克氏原螯虾生长及其体内富集的影响 [D]. 扬州: 扬州大学, 2012.
- WANG S L. Effects of Cd^{2+} , Pb^{2+} and Cu^{2+} on the growth and enrichment of *Procamaeuskneri* [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2012. (in Chinese)
- [28] 郭雪莲, 吕宪国, 郗敏. 植物在湿地养分循环中的作用 [J]. 生态学杂志, 2007 (10): 1628-1633.
- GUO X L, LV X G, XI M. The role of plants in nutrient cycling in wetlands [J]. *Journal of Ecology*, 2007 (10): 1628-1633. (in Chinese)
- [29] 尹澄清, 邵霞, 王星. 白洋淀水陆交错带土壤对磷氮截留容量的初步研究 [J]. 生态学杂志, 1999 (5): 7-11.
- YIN C Q, SHAO X, WANG X. Preliminary Study on Phosphorus and Nitrogen Interception Capacity of Soil in the Water-Land Interlaced Zone of Baiyangdian Lake [J]. *Journal of Ecology*, 1999 (5): 7-11. (in Chinese)
- [30] 许炼烽, 邓绍龙, 陈继鑫, 等. 河流底泥污染及其控制与修复 [J]. 生态环境学报, 2014, 23 (10): 1708-1715.
- XU L F, DENG S L, CHEN J X, et al. River Sediment Pollution and Its Control and Rehabilitation [J]. *Journal of Ecological Environment*, 2014, 23 (10): 1708-1715. (in Chinese)

(责任编辑: 张 梅)