

# 基于背角无齿蚌生物监测鄱阳湖和微山湖的重金属污染

郑浩然<sup>1</sup>, 陈修报<sup>2</sup>, 刘洪波<sup>2</sup>, 姜涛<sup>2</sup>, 杨健<sup>1,2\*</sup>

(1. 南京农业大学无锡渔业学院, 江苏 无锡 214081; 2. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 中国水产科学研究院长江中下游渔业生态环境评价和资源养护重点实验室, 江苏 无锡 214081)

**摘要:**基于“淡水贝类观察”研究体系的专用指示生物背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*), 生物监测鄱阳湖吴城水域和微山湖二级坝水域中 Al、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Mo、Cd、Ba、Tl 和 Pb 等元素的污染状况。结果表明:鄱阳湖吴城水域蚌样中 Al、Mn、Cu 的含量显著高于微山湖 ( $P < 0.05$ ), 而前者 Fe、Co、As、Ba、Pb 的含量显著低于后者 ( $P < 0.05$ ); 两者重金属污染指数(MPI)分别为 8.4 和 22.0, 均值污染指数(AP)分别为 0.099 和 0.113, 鄱阳湖的 Cd 及微山湖的 Cd、Pb 接近轻度污染水平, 须引起重视。

**关键词:** 背角无齿蚌; 重金属; 生物监测; 鄱阳湖; 微山湖

中图分类号: O657.63; X835

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2021)04-0049-04

## Heavy Metal Pollution in the Poyang Lake and Weishan Lake by Biomonitoring Chinese Pond Mussel *Anodonta Woodiana*

ZHENG Hao-ran<sup>1</sup>, CHEN Xiu-bao<sup>2</sup>, LIU Hong-bo<sup>2</sup>, JIANG Tao<sup>2</sup>, YANG Jian<sup>1,2\*</sup>

(1. Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi, Jiangsu 214081, China;

2. Key Laboratory of Fishery Ecological Environment Assessment and Research Conservation in Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi, Jiangsu 214081, China)

**Abstract:** The pollution of Al, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd, Ba, Tl, and Pb in Wucheng area of the Poyang Lake and Erjiba area of the Weishan Lake were studied using *Anodonta woodiana* as an indicator bivalve species based on “Freshwater Mussel Watch” project. The results showed that the contents of Al, Mn and Cu in the mussels of the Poyang Lake were significantly higher than those in the Weishan Lake ( $P < 0.05$ ), while the contents of Fe, Co, As, Ba and Pb in the former were significantly lower than those in the latter ( $P < 0.05$ ). The metal pollution index (MPI) of the two was 8.4 and 22.0, and the average pollution index (AP) was 0.099 and 0.113, respectively. Furthermore, Cd in the Poyang Lake, as well as Cd and Pb in the Weishan Lake were close to light pollution level, and must be paid attention to.

**Key words:** *Anodonta woodiana*; Heavy metals; Biomonitoring; The Poyang Lake; The Weishan Lake

重金属是淡水生态系统中关键污染物<sup>[1-2]</sup>。贝类被证实为生物监测水环境重金属污染的理想指示生物<sup>[3]</sup>。通过不断采集并长期保存贝类标本, 建立相应的“环境标本银行”(Environmental Specimen Bank), 再根据需要选取“银行”中的目标标本进行检测, 已成为国际上回溯和监测特定污染物时空动态的重要手段, 其结果可为政府环保决策的制定提供重要依据<sup>[4]</sup>。背角无齿蚌是我国特有物

收稿日期: 2020-05-23; 修订日期: 2021-05-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31502166); 中国水产科学研究院基本科研业务基金资助项目(2019GH10); 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心基本科研业务基金资助项目(2019JBFM05); 中国水产科学研究院科技创新团队基金资助项目(2020TD18)

作者简介: 郑浩然(1996—), 男, 江苏南京人, 硕士, 从事渔业生态环境评价与保护研究。

\* 通信作者: 杨健 E-mail: jiany@ffrc.cn

种,已被筛选为“淡水贝类观察”研究体系的专用指示生物<sup>[5-6]</sup>,成功应用于淡水渔业生态环境中有机、无机污染物和藻毒素的污染评价及毒理学研究。

吴城水域位于鄱阳湖国家级自然保护区的核心区域,其重金属污染备受关注<sup>[7-8]</sup>。微山湖既是日常生活和生产的重要水源,也是南水北调的调蓄水区<sup>[7]</sup>,该湖重金属曾达重污染水平<sup>[9]</sup>,其二级坝水域重金属污染亦受关注<sup>[10]</sup>。今初步建立了“背角无齿蚌标本银行”,低温(-20℃或-80℃)条件下保存了近17年采自不同水域的野生蚌,可对鄱阳湖吴城和微山湖二级坝水域中重金属污染进行生物监测,并评价其污染状况。

## 1 试验

### 1.1 主要仪器与试剂

7500ce型电感耦合等离子体质谱仪,美国Agilent公司;ETHOS A T260型微波消解仪,意大利Milestone公司;DHG-9070A型电热鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司。

于2013年11月20日、2016年6月24日分别在鄱阳湖吴城水域和微山湖二级坝水域采集10个规格相似、年龄均为3龄的背角无齿蚌。用游标卡尺测量壳长、壳宽和壳高,并用电子天平称量软组织的湿重和干重(于烘箱中80℃干燥24h),相关生物学特征见表1。

### 1.2 样本消解和重金属测定

背角无齿蚌中重金属含量测定参考文献<sup>[11]</sup>。分离出软组织并用超纯水冲洗6遍,于干燥箱中80℃干燥24h至恒重。计算软组织含水率,以便重金属干重和湿重含量之间换算。将干样研磨至粉末状,称量(0.1±0.005)g置于消解管中,加入5mL的浓硝酸微波消解。应用ICP-MS同步测定蚌样中14种元素(Al、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Mo、Cd、Ba、Tl和Pb)。以Li、Sc、Ge、Y、In、Bi为内标,所有元素的加标回收率为98.0%~108%。

表1 背角无齿蚌生物学特征

特征指标	鄱阳湖吴城水域	微山湖二级坝水域
壳长 <i>l</i> /cm	8.5~11.7	9.0~11.3
壳宽 <i>d</i> /cm	3.4~5.0	3.6~4.5
壳高 <i>h</i> /cm	6.5~8.4	5.8~7.6
软组织湿重 <i>m</i> /g	13.6~40.1	17.1~43.0
软组织干重 <i>m</i> /g	1.3~4.5	1.0~3.5
含水率/%	76.8~93.6	91.4~94.0

### 1.3 统计分析

应用SPSS 22.0的*t*检验比较鄱阳湖吴城水域和微山湖二级坝水域蚌样中重金属含量,并用Pearson相关性分析确定重金属之间的相关性。应用MATLAB 9.0统计软件中的SOM Toolbox 2.0工具包进行不同水域蚌样中重金属的自组织映射(SOM)聚类分析<sup>[12]</sup>。采用重金属污染指数(MPI)、重金属残留量指数(*I*)及均值污染指数(AP)<sup>[13]</sup>进行污染评价。Cu的评价标准参照《无公害食品 水产品中有毒有害物质限量》(NY 5073—2006)规定的50 μg/g(湿重);Cr、As、Cd和Pb的评价标准按照《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)分别规定的2.0 μg/g、0.5 μg/g、2.0 μg/g和1.5 μg/g(湿重)。由于目前我国食品、水产品还没有其余重金属的限量标准,故暂不计入。

$$MPI = (C_{i1} \times C_{i2} \times \dots \times C_{in})^{1/n} \quad (1)$$

式中: $C_{in}$ 指样品中第*n*种重金属的平均干重质量比,μg/g。

$$I = C_i / C_{s,i} \quad (2)$$

式中: $C_i$ 为蚌样中重金属*i*平均湿重质量比,μg/g; $C_{s,i}$ 为重金属*i*限量,μg/g。

$$AP = I/N \quad (3)$$

式中:*I*为重金属残留量指数;*N*为重金属种类数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 重金属测定结果

鄱阳湖吴城水域和微山湖二级坝水域背角无齿蚌软组织中各元素含量见表2(Tl在所有样本中均未检出,故未列入),所有数据均为干重。鄱阳湖吴城水域蚌样中Al、Mn、Cu的含量显著高于微山湖二级坝水域蚌样( $P < 0.05$ ),前者Fe、Co、As、Ba、Pb的含量显著低于后者( $P < 0.05$ ),其余重金属在两者之间差异不显著( $P > 0.05$ )。

鄱阳湖吴城水域背角无齿蚌中Cu、Zn、Pb、Cd测定值均显著高于未受到重金属污染的无锡南泉基地蚌样<sup>[14]</sup>。李传琼等<sup>[15]</sup>研究显示鄱阳湖赣江水系(吴城水域属于赣江水系)中Al(6.0 μg/L~989.7 μg/L)、Cu(0.96 μg/L~22.1 μg/L)和Pb(0.18 μg/L~3.6 μg/L)的污染源超过40%来自采矿废水;Cd(0.002 μg/L~2.7 μg/L)的污染源超过35%来自矿渣和农田土壤降雨淋滤;Mn(0.9 μg/L~216.4 μg/L)的污染源超过41%来自

钢铁冶炼废水。微山湖流域是山东省重要工业区，之前存在工业废水和生活污水未经处理直接排入湖中的现象<sup>[10]</sup>。蒋万祥等<sup>[9]</sup>研究显示微山湖中 Cu 和 Pb 的均值分别为 0.035 9 mg/L 和 0.112 mg/L，超标率分别高达 100% 和 70%。上述

研究发现微山湖二级坝水域蚌样中 Fe、Co、As、Ba 和 Pb 含量显著高于鄱阳湖吴城水域蚌样 ( $P < 0.05$ )，这与前人研究结果相吻合<sup>[16]</sup>，说明利用背角无齿蚌可以有效监测、评价水环境重金属污染状况。

表 2 背角无齿蚌软组织中元素测定结果 μg/g  
Table 2 The results of element content in the soft tissues of *Anodonta woodiana* μg/g

元素	鄱阳湖吴城水域		微山湖二级坝水域	
	平均值 ± 标准差	范围	平均值 ± 标准差	范围
Al	276 ± 148	100 ~ 593	143 ± 128	28.6 ~ 417
Cr	2.82 ± 0.20	2.45 ~ 3.09	2.78 ± 0.22	2.48 ~ 3.09
Mn	3 661 ± 1 075	2 328 ~ 6 030	2 421 ± 1 888	230 ~ 5 499
Fe	2 021 ± 358	1 713 ~ 2 901	4 397 ± 1 230	2 301 ~ 6 269
Co	0.03 ± 0.09	— ~ 0.29	1.09 ± 0.68	— ~ 2.06
Ni	—	—	0.12 ± 0.29	— ~ 0.88
Cu	12.1 ± 3.69	8.09 ~ 20.0	4.23 ± 1.85	— ~ 5.96
Zn	220 ± 26.0	182 ~ 261	247 ± 71	134 ~ 397
As	1.04 ± 1.17	— ~ 2.75	4.41 ± 1.99	2.13 ~ 8.79
Mo	2.03 ± 0.09	1.90 ~ 2.17	2.53 ± 0.18	2.31 ~ 2.96
Cd	3.14 ± 1.70	0.83 ~ 6.29	4.62 ± 2.67	— ~ 9.99
Ba	267 ± 67.4	203 ~ 415	2 664 ± 1 799	323 ~ 5 677
Pb	1.29 ± 0.72	0.47 ~ 2.61	3.61 ± 1.26	1.68 ~ 5.91

### 2.2 重金属积累特征

鄱阳湖吴城水域和微山湖二级坝水域蚌样中重金属积累具有明显的差异性，SOM 聚类分析将鄱阳湖和微山湖蚌样区分为两类。鄱阳湖蚌样中 Fe - Mn、Co - Mn、Zn - Mn、Mo - Zn、Cd - Cu、Cd - Zn、Ba - Mn、Ba - Fe、Ba - Co、Ba - As、Pb - Mn、Pb - Zn、Pb - Cu、Pb - As、Pb - Mo 之间呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。微山湖蚌样中 Cr - Al、Fe - Cr、Co - Cr、Co - Fe、Ni - Al、Ni - Cr、Ni - Mn、Cu - Cr、Cu - Fe、Cu - Co、Zn - Al、Zn - Cr、Zn - Mn、Zn - Fe、Zn - Co、Zn - Ni、As - Co、Cd - Cr、Cd - Fe、Cd - Co、Cd - Ni、Cd - Cu、Cd - Zn、Pb - Fe、Pb - Cu、Pb - Cd 之间呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。贝类主要通过摄食和过滤作用吸收重金属，并与具有互补生理活性的金属化合物或具有较强亲和力的生物大分子结合<sup>[17]</sup>。因此，背角无齿蚌积累重金属的相关性非常复杂<sup>[18]</sup>。上述研究发现鄱阳湖吴城水域和微山湖二级坝水域蚌样中除了 Zn - Mn、Cd - Cu、Cd - Zn、Pb - Cu 均呈显著相关之外，其余显著相关的重金属在上述两水域蚌样中皆不相同。这与陈修报等<sup>[14]</sup>研究发现背角无齿蚌中重金属相关性的复杂程度与水环境中重金属的污染程度具有共同的变化趋势相一致。

### 2.3 重金属污染评价

鄱阳湖吴城水域和微山湖二级坝水域蚌样 MPI 分别为 8.4 和 22.0。不同水域蚌样的重金属残留量指数  $I_{Cr}$  分别为 0.156 和 0.101,  $I_{Cu}$  分别为 0.026 9 和 0.006 1,  $I_{As}$  分别为 0.039 9 和 0.111 3,  $I_{Cd}$  分别为 0.174 5 和 0.168 5,  $I_{Pb}$  分别为 0.095 1 和 0.175 6, AP 分别为 0.099 和 0.113。其中，鄱阳湖吴城水域蚌样中 Cd 的  $I$  值最高，而微山湖二级坝水域蚌样中 Pb 的  $I$  值最高。

Usero 等<sup>[19]</sup>研究表明，生活在清洁水域中的贝类  $MPI \leq 2.5$ ，而受重金属污染水域的  $MPI \geq 4.5$ 。陈修报等<sup>[14]</sup>研究发现太湖污染最为严重水域梅梁湾 MPI 指数为 11.1，而水质清洁的茈碧湖水域 MPI 指数为 1.0，均证明了 MPI 指数的可行性。鄱阳湖和微山湖蚌样的 MPI 值均  $> 4.5$ ，特别是微山湖的 MPI 值甚至是梅梁湾的 2 倍，显示鄱阳湖吴城水域和微山湖二级坝水域存在重金属含量过高的情况。 $I$  值和 AP 值  $< 0.2$  可视为正常背景水平， $0.2 \sim 0.6$  为轻度污染， $0.6 \sim 1.0$  为污染， $> 1.0$  为重污染<sup>[13]</sup>。鄱阳湖吴城水域和微山湖二级坝水域蚌样的 AP 值均  $< 0.2$ ，总体处于正常背景水平。然而，微山湖二级坝水域蚌样的 Pb 和 Cd，以及鄱阳湖蚌样中 Cd 残留量指数接近于轻度污染水平。

### 3 结语

背角无齿蚌可灵敏、有效地监测和评价淡水生态环境中重金属的污染状况,基于“背角无齿蚌标本银行”中保存的蚌标本所开展的上述研究表明,鄱阳湖吴城水域的Cd及微山湖二级坝水域中的Cd和Pb含量接近轻度污染水平,须引起重视。鉴于背角无齿蚌在全国乃至全球广泛分布,建议在更广泛的淡水水域中采集相关标本,一方面丰富“标本银行”,另一方面开展基于该蚌的重金属污染生物监测,从而提出更有针对性的水生态环境保护措施。

#### [参考文献]

- [1] 司家济,高良敏,解志林. 焦岗湖水环境重金属分布及健康风险评价[J]. 环境监测管理与技术,2019,31(3):41-44.
- [2] 潘莎,陈再琴,汪钊宇,等. 燃煤电厂周边河流中氟、砷和重金属污染健康风险评价[J]. 环境监测管理与技术,2019,31(4):33-37.
- [3] VAN HASSEL J H, FARRIS J L. A review of the use of unionid mussels as biological indicators of ecosystem health[M]//FARRIS J L, HASSEL J H V. Freshwater bivalve ecotoxicology. Florida: CRC Press and SETAC Press, 2007: 19-49.
- [4] KARUBE Z, TANAKA A, TAKEUCHI A, et al. Three decades of environmental specimen banking at the National Institute for Environmental Studies, Japan[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(3): 1587-1596.
- [5] 杨健,王慧,朱宏宇,等. 背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)在五里湖中的重金属富集[J]. 长江流域资源与环境,2005,14(3):362-366.
- [6] LIU H, YANG J, GAN J. Trace element accumulation in bivalves *Anodonta woodiana* from the Taihu Lake, China[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2010, 59(4): 593-601.
- [7] 张杰,陈熙,刘倩纯,等. 鄱阳湖主要入湖口重金属的分布及潜在风险评价[J]. 长江流域资源与环境,2014,23(1):95-100.
- [8] 涂宗财,庞娟娟,郑婷婷,等. 吴城鄱阳湖自然保护区鱼体重金属的富集及安全性评价[J]. 水生生物学报,2017,41(4): 878-883.
- [9] 蒋万祥,田忠景,陈静,等. 微山湖水域重金属分布特征及水质评价[J]. 淡水渔业,2012,42(4):66-70.
- [10] 李爽,张祖陆. 南四湖表层底泥重金属空间分布及污染程度评价[J]. 水资源保护,2012,28(4):6-11.
- [11] CHEN X B, SU Y P, LIU H B, et al. Active biomonitoring of metals with cultured *Anodonta woodiana*: A case study in the Taihu Lake, China[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2019, 102: 198-203.
- [12] 骆仁军,姜涛,陈修报,等. 基于稳定同位素和矿质元素的中华绒螯蟹产地鉴别潜力评价[J]. 食品科学,2020,41(2): 298-305.
- [13] 安立会,郑丙辉,付青,等. 以梭鱼金属硫蛋白基因表达监测海洋重金属污染[J]. 中国环境科学,2011,31(8):1383-1389.
- [14] 陈修报,苏彦平,孙磊,等. 不同污染背景生境中背角无齿蚌的重金属积累特征[J]. 农业环境科学学报,2013,32(5): 1060-1067.
- [15] 李传琼,王鹏,陈波,等. 鄱阳湖流域赣江水系溶解态金属元素空间分布特征及污染来源[J]. 湖泊科学,2018,30(1): 139-149.
- [16] 蒋万祥. 微山湖表层沉积物重金属含量及生态风险评价[J]. 安徽农业科学,2011,39(27):16694-16696.
- [17] VOETS J, REDEKER E S, BLUST R, et al. Differences in metal sequestration between zebra mussels from clean and polluted field locations[J]. Aquatic Toxicology, 2009, 93: 53-60.
- [18] 杨健,曲疆奇,刘洪波. 野生及养殖背角无齿蚌中元素的生物积累特征[J]. 生态环境学报, 2010, 19(3): 570-575.
- [19] USERO J, MORILLO J, GRACIA I. Heavy metal concentrations in molluscs from the Atlantic coast of southern Spain[J]. Chemosphere, 2005, 59(8): 1175-1181.
- [19] 谢文理,田颖,祁红娟,等. 太湖运河氨氮污染时空特征及来源研究[J]. 安徽农业科学,2018,46(22):61-63.
- [20] 张大伟,李杨帆,孙翔,等. 入太湖河流武进港的区域景观格局与河流水质相关性分析[J]. 环境科学,2010,31(8): 1775-1783.
- [21] 许浩,蔡永久,汤祥明,等. 太湖大型底栖动物群落结构与水环境生物评价[J]. 湖泊科学,2015,27(5):840-852.
- [22] 殷旭旺,徐宗学,高欣,等. 渭河流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报,2013,24(1): 218-226.
- [23] 刘玉,VERMAAT J E, DE RUYTER E D, 等. 珠江、流溪河大型底栖动物分布和氮磷因子的相关分析[J]. 中山大学学报(自然科学版),2003,42(1):95-99.
- [24] 秦伯强,罗淑葱. 太湖生态环境演化及其原因分析[J]. 第四纪研究,2004,24(5):561-568.

(上接第39页)

American Benthological Society, 2010, 29: 207-219.

- [13] 李爱权,宋晓兰. 溇湖富营养化进程及其综合整治对策研究[J]. 环境科学与管理,2013,38(8):85-87.
- [14] 邵勇,王洪杨,徐姣,等. 溇湖入湖河流春季大型底栖动物群落结构及水质生物学评价[J]. 生态学杂志,2020,39(5): 1617-1628.
- [15] 朱振宇. 浅谈溇湖水环境发展和对河湖治理的建议[J]. 城市建设理论研究(电子版),2013(5):1-3.
- [16] 何志辉,严生良,杨和荃,等. 淡水生物学(上册)(分类学部分)[M]. 北京:农业出版社,1982:181-334.
- [17] 刘玉,杨翼,张文亮,等. 溇洲湾潮间带大型底栖动物群落结构和多样性特征[J]. 湿地科学,2014,12(2):148-154.
- [18] JOLLIFFE I T, RINGROSE T J. Canonical correspondence analysis: Encyclopedia of statistical sciences[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2006.