

不同污染背景生境中背角无齿蚌的重金属积累特征

陈修报¹, 苏彦平¹, 孙磊², 刘洪波¹, 杨健^{1,2*}

(1.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内陆渔业生态环境与资源重点开放实验室, 江苏 无锡 214081;
2.南京农业大学渔业学院, 江苏 无锡 214081)

摘要:以中国水产科学研究院淡水渔业研究中心南泉基地(无明显外源污染)、太湖梅梁湾(历史上污染较为严重)以及云南茈碧湖(高原洁净湖泊)生境中的背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)为对象,应用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)分析了蚌样软组织中15种重金属(Al、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Mo、Ag、Cd、Ba、Tl和Pb)的积累特征。结果表明:南泉基地养殖蚌中Al、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As、Cd和Ba的含量显著低于梅梁湾野生蚌($P<0.05$),茈碧湖野生蚌中Al、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Ba和Pb的含量显著低于梅梁湾蚌样($P<0.05$),但前者Mo和Tl的含量显著高于后者($P<0.05$);南泉基地蚌样中Cr、Fe、Mo和Tl的含量显著低于茈碧湖蚌样($P<0.05$),而Cu、As和Pb的含量显著高于后者($P<0.05$)。梅梁湾、南泉基地和茈碧湖蚌的金属污染指数(MPI)分别为11.1、1.8和1.0,显示出南泉基地养殖蚌重金属总体污染水平很低,与生活于洁净水体茈碧湖中蚌的情况相近,而远低于采自太湖梅梁湾蚌的水平。

关键词:背角无齿蚌;重金属;生物积累;监测;水环境

中图分类号:X503.225 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)05-1060-08 doi:10.11654/jaes.2013.05.026

Bioaccumulation Characteristics of Heavy Metals in Bivalve *Anodonta woodiana* from Different Habitats with Different Pollution Backgrounds

CHEN Xiu-bao¹, SU Yan-ping¹, SUN Lei², LIU Hong-bo¹, YANG Jian^{1,2*}

(1.Key Open Laboratory of Ecological Environment and Resources of Inland Fisheries, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China; 2.Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081, China)

Abstract: The bioaccumulation characteristics of heavy metals (Al, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Ag, Cd, Ba, Tl, and Pb) in bivalve *Anodonta woodiana* from Nanquan Aquatic Base of Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences (without obvious exogenous contamination of heavy metal), Meiliang Bay of Taihu Lake (suffered relatively serious pollution) and Cibihu Lake in Yunnan Province (a very clean plateau lake) were investigated by an Agilent 7500ce inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The results of present study showed that concentrations of Al, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Cd and Ba in cultured mussels of Nanquan Aquatic Base were significantly lower than those of wild mussels from Meiliang Bay ($P<0.05$). Moreover, concentrations of Al, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Ba and Pb of wild mussels from Cibihu Lake were significantly lower than those of wild mussels from Meiliang Bay ($P<0.05$), while concentrations of Mo and Tl in the former were significantly higher than the latter ($P<0.05$). Additionally, lower concentrations of Cr, Fe, Mo and Tl could be found in cultured mussels than those of wild ones from Cibihu Lake ($P<0.05$). However, concentrations of Cu, As and Pb in the former were significantly higher than the latter ($P<0.05$). Similar metal pollution indexes (MPI) were observed between the mussels from Nanquan Aquatic Base (1.8) and Cibihu Lake (1.0), while both indexes were obviously lower than that of the mussels from Meiliang Bay (11.1).

Keywords: *Anodonta woodiana*; heavy metal; bioaccumulation; monitoring; aquatic environment

收稿日期:2012-12-13

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31072214);人力资源与社会保障部高层次留学人才回国工作资助项目(2-115084)

作者简介:陈修报(1983—),男,江苏徐州人,博士,主要研究方向为水域生态环境的监测与保护。

*通信作者:杨健 E-mail: jiany@ffrc.cn

自“贻贝观察”(Mussel Watch)提出以后^[1],基于贝类的生物监测已广泛应用于海洋、河口及淡水生态环境中污染物的监测和评价^[2]。背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)作为“淡水贝类观察”的指示生物^[3]能够有效地反映水体重金属的污染水平^[4-6]。然而,绝大多数的贝类监测均属于被动监测(Passive Biomonitoring),作为采集并分析特定水域野生贝类体内的污染物含量以评价水体污染水平的方法^[7-8],面临着采集样本的规格、年龄、生长速率、性成熟程度和重金属暴露史等影响重金属积累的生物因子很难保持一致^[9],在某些水域采不到足够的样本甚至根本没有样本可采^[10]等难题。因此,移植未受污染水体中的贝类(如养殖的蚌类)至待测水域然后定期回收分析的主动监测(Active Biosurveillance)^[7-8]越来越受到重视。

Sunlu^[11]研究发现土耳其 Izmir 海湾养殖的紫贻贝(*Mytilus galloprovincialis*)软组织中 Pb、Cd、Cu、Zn 和 Ni 的含量明显低于该海域野生贝。杨健等^[12]揭示了养殖背角无齿蚌软组织中 Cr、Cu、Cd 和 Ni 的含量显著低于太湖三山岛水域野生蚌。Lukashev^[13]还证实了鸭嘴无齿蚌(*A. anatina*)软组织中 Ni、Cu 和 Zn 的含量在洁净的河流上游显著低于受生活污水污染的下流。作为建立淡水环境“标准背角无齿蚌移植观察”体系的一项基础研究,本文系统分析了不同水环境(洁净、没有明显外源污染和历史上污染较为严重)背角无齿蚌体内 15 种重金属(Al、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Mo、Ag、Cd、Ba、Tl、Pb)的积累特征,其中:中国水产科学研究院淡水渔业研究中心南泉基地(简称南泉基地,下同)平均水深 1.5 m,全封闭,没有明显的外源污染物;梅梁湾位于太湖的最北端,面积 123.8 km²,平均水深 1.5 m,受到工业废水、农业生产以及生活污水的综合影响,是太湖污染较为严重的水域^[14-15];茈碧湖位于云南省,属于典型的高原湖泊,面积 32 km²,平均水深 3 m,水质非常清洁^[16]。本研究通过了解背角无齿蚌体内重金属积累与水环境中重金属背景含量之间的关系,进而探索利用养殖蚌主动监测自然水体重金属污染动态的可行性。

1 材料与方法

1.1 样本采集

2010 年 4—7 月,在南泉基地的养殖池塘、太湖梅梁湾和茈碧湖共采集 15 个规格相似的背角无齿蚌(图 1)。样本采集后置于曝气的自来水中暂养 72 h 以清空肠道内容物,然后用不锈钢解剖刀分离出软组织,独立分装,并置于-20 ℃冰箱中冷冻保存。它们的生物学特征见表 1。

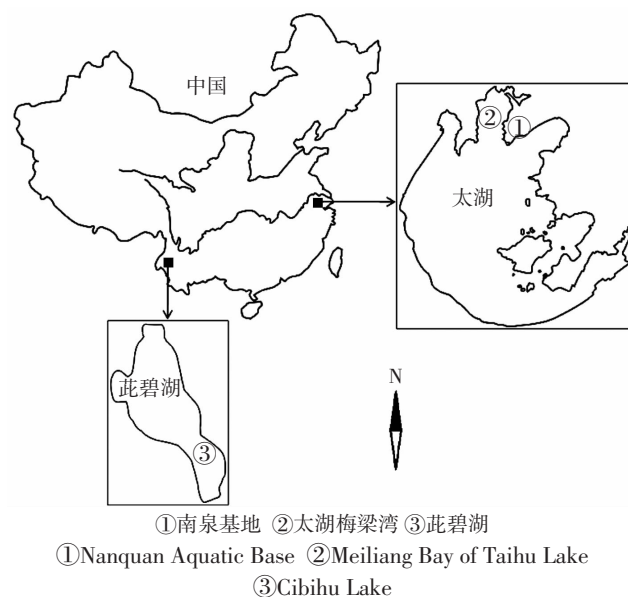


图 1 背角无齿蚌采样点

Figure 1 Sample sites of *Anodonta woodiana*

1.2 消解和测定方法

分析前,将所有蚌样置于室温解冻,然后分别用 Milli-Q 水清洗 6 遍。南泉基地与梅梁湾的蚌样用冷冻干燥机(ALPHA1-4LSC, Christ Corp, 德国)彻底干燥,并用粉碎机(A11, IKA Corp, 德国)制成均匀粉末状。茈碧湖的蚌样置于 80 ℃烘箱中干燥 24 h 至恒重,然后于玛瑙研钵中磨成均一粉末状。

样本的消解和测定参照 Chen 等^[17]的方法。精确称量干燥粉末样本(0.1±0.005)g 放入酸洗过的特氟隆消解管中,加入 10 mL 纯硝酸(Merck, 德国),用微

表 1 背角无齿蚌的生物学性状(平均值±标准差)

Table 1 Biometry data (Mean±SD) of *Anodonta woodiana* collected

采样点	n	年龄/a	壳长/cm	壳宽/cm	壳高/cm	软组织湿重/g	软组织干重/g	干重/湿重比值
南泉基地	5	3	10.4±0.3	4.2±0.2	6.8±0.3	47.4±7.8	5.7±1.2	0.12
梅梁湾	5	3	10.5±0.3	4.4±0.2	6.9±0.2	35.9±4.1	4.8±0.9	0.13
茈碧湖	5	3	12.3±0.6	4.7±0.4	7.8±0.3	46.1±6.5	5.1±1.1	0.11

波消解仪(ETHOS A T260, Milestone Inc, 意大利)进行彻底消解(10 min, 120 °C; 15 min, 170 °C; 再次 15 min, 170 °C), 最后转移至酸洗过的特氟隆定容瓶, 用 Milli-Q 水定容至 200 mL。应用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS; 7500ce, Agilent, 美国), 以 Li、Sc、Ge、Y、In 和 Bi 为内标, 同时测定 Al、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Mo、Ag、Cd、Ba、Tl 和 Pb 的含量, 并通过标准添加回收确认仪器的测量精度, 所有重金属的回收率为 99.4%~109.2%。

1.3 统计分析

所得数据运用 SPSS 16.0 (SPSS Inc, 美国) 统计软件分析。应用 Mann-Whitney U 检验分析不同水环境蚌样中重金属含量, $P<0.05$ 表示差异水平显著。进而用判别分析(Discriminant Analysis)研究它们的重金属积累特征。此外, 用 Pearson 等级相关系数分析重金属之间的相关性。除特别说明之外, 所有重金属含量均以 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 干重表示。

另外, 采用金属污染指数(Metal Pollution Index, MPI)总体评价不同生境重金属污染情况。根据 Usero 等^[18-19]的方法计算:

$$\text{MPI} = (Cf_1 \times Cf_2 \cdots Cf_n)^{1/n}$$

式中: Cf_n 是指样品中第 n 种重金属的浓度。

2 结果与讨论

2.1 重金属含量与积累特征

除了 Co 和 Ag 在所有样本中均未检出之外, 不同生境中背角无齿蚌重金属含量见表 2。南泉基地养殖蚌中所有重金属含量均低于梅梁湾野生蚌(Co、Ag 和 Tl 未检出), 且前者 Al、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Ba 的含量显著低于后者($P<0.05$)。苕碧湖野生蚌中 Al、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Ba 和 Pb 的含量显著低于梅梁湾野生蚌($P<0.05$), 但是前者 Mo 和 Tl 的含

量显著高于后者($P<0.05$)。南泉基地养殖蚌中 Cr、Fe、Mo 和 Tl 的含量显著低于苕碧湖野生蚌($P<0.05$), 但 Cu、As 和 Pb 的含量显著高于后者($P<0.05$)。南泉基地、梅梁湾和苕碧湖蚌样 MPI 分别为 1.8、11.1 和 1.0 (表 2)。对不同生境蚌样中重金属含量进行逐步判别分析, 从 15 种重金属中确定有显著贡献的 5 个变量 Fe、Ni、Cu、Mo 和 Pb, 建立两个判别函数分别为:

$$F1 = 1.809C_{\text{Fe}} - 3.355C_{\text{Ni}} + 3.446C_{\text{Cu}} - 2.737C_{\text{Mo}} + 1.147C_{\text{Pb}} \quad (P<0.01)$$

$$F2 = -1.241C_{\text{Fe}} - 0.420C_{\text{Ni}} + 1.963C_{\text{Cu}} + 1.981C_{\text{Mo}} - 2.085C_{\text{Pb}} \quad (P<0.01)$$

南泉基地养殖蚌分布于第四象限, 梅梁湾野生蚌分布于第一象限, 苕碧湖野生蚌分布于第二象限, 判断的准确率达到 100% (图 2)。

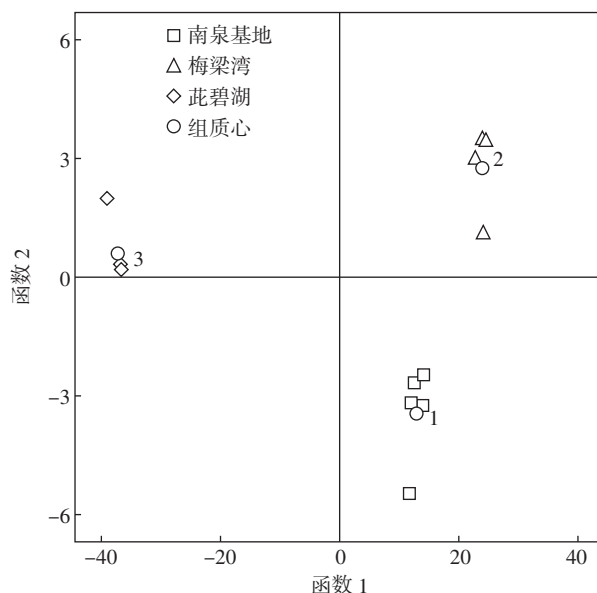


图2 不同生境背角无齿蚌重金属含量的判别分析

Figure 2 Discriminant analysis for heavy metal concentrations of *Anodonta woodiana* at different habitats

表2 背角无齿蚌体内重金属含量($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 干重)与金属污染指数

Table 2 Heavy metal concentrations ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ dry weight) and metal pollution index (MPI) in soft tissues of *Anodonta woodiana*

采样点	Al	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Ba	Tl	Pb	MPI
南泉基地	17±5.6 ^b (11~25)	0.3±0.3 ^c (nd~0.8)	1680±228 ^b (1296~1843)	342±47 ^b (275~386)	nd ^b	4.8±0.2 ^b (4.4~5.0)	140±20 ^b (119~162)	4.1±0.3 ^b (3.6~4.4)	0.02±0.04 ^b (nd~0.1)	0.1±0.1 ^b (nd~0.3)	159±26 ^b (116~179)	nd ^b	0.7±0.4 ^a (0.2~1.2)	1.8
梅梁湾	235±177 ^a (76~538)	0.8±0.4 ^b (0.4~1.4)	6422±3025 ^a (3553~10835)	1925±796 ^a (1121~3130)	1.8±1.3 ^a (0.7~4.1)	8.0±1.1 ^a (7.0~9.8)	400±183 ^a (206~662)	5.9±0.5 ^a (5.2~6.5)	0.2±0.2 ^b (nd~0.4)	1.4±1.0 ^a (0.4~3.0)	829±380 ^a (426~1390)	nd ^b	2.1±1.6 ^a (0.6~4.8)	11.1
苕碧湖	19±13 ^b (2.8~38)	2.0±1.1 ^a (0.5~3.4)	1726±1470 ^b (112~3184)	2379±1611 ^a (871~4707)	nd ^b	nd ^c	149±36 ^b (116~205)	1.5±1.4 ^c (nd~3)	1.3±0.2 ^a (1.2~1.5)	nd ^b	155±87 ^b (63~283)	0.1±0 ^a (0.1~0.1)	nd ^b	1.0

注: 结果以平均值±标准差(范围)表示; nd, 未检出, 本研究中检测限参照 0.001 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[20]; Co 和 Ag 均未检测出, 故未列入; 同一列上标不同字母表示差异水平显著($P<0.05$)。

双壳贝类体内重金属的来源主要有三种途径:

(1) 通过食物网摄取和积累是重金属的主要来源^[21-22]。

(2) 从过滤的大量水体中,鳃不断吸收溶解在水中的金属离子并通过血液输送到各个部位是重金属积累的重要途径^[21-22]。

(3) 水体中溶解的重金属还可能会通过渗透作用穿过软组织表皮并在体内积累^[22]。

背角无齿蚌对重金属(Cu、Zn 和 Cd)的吸收率与周围水体重金属的背景含量呈正相关,但吸收率的高低顺序始终为 $Zn > Cd > Cu$ ^[23]。这与三角帆蚌(*Hyriopsis cumingii*)对 Cu、Zn 和 Cd 吸收率的高低顺序一致,但在相同条件下背角无齿蚌对 Cu、Zn 和 Cd 的吸收率分别是三角帆蚌的 1.2、1.9 和 1.5 倍^[23]。重金属进入背角无齿蚌体内之后,不同组织/器官对它们的积累具有明显的选择性,约 40% 的 Al、Mn、Ni、Cu、Zn 和 As 积累在鳃中,而 40% 左右的 Fe、As 和 Pb 则积累在内脏团中^[24]。尽管如此,背角无齿蚌对重金属的积累机制(如选择性、吸收速率和排放速率)尚不明确,还有待于进一步的研究。

南泉基地是全封闭的,采用循环水养殖,远离工业、农业和生活排污污染源,且在养蚌过程中不进行额外的投饵。养殖蚌体内重金属的背景含量较低,不仅 Al、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Ba 的含量显著低于梅梁湾野生蚌(表 2),而且 Mn、Fe、Zn、Mo 的含量明显低于太湖其他水域、宜兴养殖基地以及波兰水域的同种蚌类(表 3),Cu 和 Cd 含量亦低于太湖三山岛、漫山和大浦水域及波兰水域野生蚌(表 3),甚至 Cr、Fe、Mo 和 Tl 的含量低于高原洁净水体茈碧湖野生蚌(表 2)。MPI 指数能够综合反映水环境重金属污染水平。Usero 等^[19]研究表明清洁水域中双壳贝类(如 *Donax trunculus*) $MPI \leq 2.5$,而受重金属污染水域的 $MPI \geq 4.5$ 。南泉基地蚌样 MPI(1.8)低于 2.5,进一步表明该水体没有受到明显的重金属污染。Benedicto 等^[26]利用移殖未受污染水域养殖的紫贻贝,在地中海的 123 个位点进行重金属监测,结果显示沿岸水域因受到矿业和工业废水排放的影响重金属含量波动很大,Cd、Ni 和 Pb 的含量分别为 1.97~2.11、2.18~3.20、3.1~3.8 $\mu g \cdot g^{-1}$ 。此外,通过移殖监测还发现了原本被认为是非常洁净的水域已受到重金属的影响,如西班牙 Fornells 水域中 Ni 的含量已达到 1.2 $\mu g \cdot g^{-1}$,Cala Treboluya 水域 Pb 和 Cd 的含量分别高达 2.0、2.16 $\mu g \cdot g^{-1}$,Cabrera 水域的 Cd 也达到 2.58 $\mu g \cdot g^{-1}$,从而起到了早

期预警作用。背角无齿蚌能够灵敏、有效地反映出水环境重金属污染动态^[4,9]。因此,今后移殖南泉基地养殖蚌对自然水体进行主动监测具有可行性,不仅可最大限度地减少生物指示物背景差异对监测结果的影响,还能突破目前贝类监测高度依赖采集野生资源的局限。这些都为我们正在尝试中的,通过人工繁育技术在未受污染水域的南泉基地建立规格、年龄、生长速率和性成熟程度等生物因子一致,污染物暴露史相同,重金属背景含量较低的“标准化”的养殖蚌,以适应今后大规模、规范化、信息化的“标准背角无齿蚌观察”研究体系需求的工作提供了理论依据。

梅梁湾系太湖北部一个口袋型湖湾,水体交换频率低,年均换水不足两次,非常容易滞纳污染物^[14]。传统的观点认为梅梁湾主要受到有机污染和严重富营养化^[14],然而本研究发现其重金属污染趋势也很严峻。该水域蚌样 Al、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Ba 的含量显著高于南泉基地,且 Al、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Ba 和 Pb 的含量显著高于茈碧湖(表 2)。此外,Cr 和 Ni 的含量亦明显高于宜兴养殖基地和太湖其他水域,Pb 的含量也高于太湖漫山、湖州和大浦水域(表 3)。而且其 MPI(11.1)分别是南泉基地和茈碧湖的 6 倍和 11 倍之多(表 2),已达到重金属污染水平($MPI \geq 4.5$)^[19]。不仅如此,梅梁湾底泥中重金属 As、Ag、Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的含量分别高达 64、4.2、0.93、14.2、155、144、79.8、143、471 $\mu g \cdot g^{-1}$,亦为太湖污染最为严重的区域^[27]。重金属的污染源主要来自直湖港河^[27]。直湖港河介于无锡和常州两市交界处,全长 20.1 km,平均宽度 30~40 m,沿岸人口密集(地区人口 39.9 万),工业发达(具有工业企业 2746 家),以化工、印染、电镀、食品和造纸等行业为主^[28]。合成橡胶与制造 PVC 材料离不开 Zn、Pb 和 Cd 作为稳定剂及添加剂,金属电镀则会产生大量的 Cu、Zn 和 Ni,而皮革制造容易导致 Cr 污染^[27]。然而该区域污水处理厂配套管网建设滞后,工业废水和生活污水集中处理率甚低,仅分别达到 15.4% 和 33.8%,其余大部分直接排放,并以约 $10 m^3 \cdot s^{-1}$ 的流量进入梅梁湾^[28]。

茈碧湖的海拔高度为 2033 m,属于典型的高原湖泊,水质清洁^[16],然而迄今尚缺乏其重金属含量的报道。本研究首次对生活在其中的背角无齿蚌重金属含量进行分析,结果表明除 Mo 和 Tl 之外其余重金属含量都很低。不仅蚌样中 Al、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Ba 和 Pb 的含量显著低于梅梁湾,Cu、As 和 Pb 的含量显著低于南泉基地(表 2),而且 Mn 和 Cu 含量明

显低于宜兴养殖基地、太湖其他水域以及波兰水域, Zn 和 As 含量低于太湖其他水域和波兰水域, Cd 含量亦低于宜兴养殖基地、太湖三山岛和马山水域以及波兰水域(表 3)。此外, 其 MPI 仅为 1.0, 远低于清洁水体 $MPI \leq 2.5$ 的水平^[19], 进一步提示茈碧湖没有受到重金属污染。值得注意的是, 茈碧湖蚌样中 Mo 和 Tl 的含量相对于其他水域的同种蚌类比较高(表 3)。这可能与云南是“有色金属王国”, 地层中 Mo 和 Tl 的背景含量较高有关^[29], 如云南会泽铅锌矿石中 Mo 和 Tl 的含量就分别达到了 4.4 、 $6.2 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[30]。

2.2 重金属积累相关性意义

不同污染背景生境中背角无齿蚌重金属积累之间的相关性见表 4。南泉基地养殖蚌中 Fe-Zn、Fe-Cd 和 Zn-Pb 之间呈显著正相关($P < 0.05$), Al-Cd、Cr-Mo 及 Fe-Pb 之间极显著正相关($P < 0.01$)。梅梁湾野生蚌 Mn-Cu、Mn-Cd、Mn-Pb、Fe-Ni、Fe-Cu、Fe-Cd、Fe-Pb、Ni-Pb、Cu-Mo、Cu-Cd、Cu-Pb、Zn-Cd、Zn-Pb 和 Mo-Pb 之间呈显著正相关($P < 0.05$), Mn-Zn、Mn-Mo、Ni-Cu、Zn-Mo、Mo-Cd 以及 Cd-Pb 之间极显著正相关($P < 0.01$)。茈碧湖野生蚌 Cr-Fe、Cr-As、Mn-Ba、Fe-Mo 和 Mo-Ba 之间呈显著正相关($P < 0.05$)。

通过摄食和溶解在水体中重金属离子的双重暴露, 双壳贝类主动和被动地积累了各种重金属^[22]。元素(重金属)进入生物体内, 它们之间会形成生理活性互补的金属化合物, 或被具有强亲和力的生物大分子共同结合, 此外作为酶活性中心的金属元素还可能会被化学性质相似的元素所置换^[31]。同时, 贝类也会通过金属硫蛋白的结合、富含金属颗粒的隔离以及自身代谢等解毒机制降低体内积累的重金属的毒性^[32-33]。因

此, 背角无齿蚌积累重金属的相关性非常复杂^[12]。呈正相关的重金属之间往往具有相似的理化性质, 并且在动物体内通过类似的生化途径进行代谢或由特殊的配体共同结合^[34]。本研究发现虽然不同水域背角无齿蚌重金属积累均呈正相关, 但重金属种类和复杂性差异明显。除了 Fe-Cd 和 Fe-Pb 在南泉基地与梅梁湾蚌样中呈显著相关之外, 其余显著相关的重金属在南泉基地、梅梁湾和茈碧湖三者蚌样中皆不相同(表 4)。而且, 杨健等^[12]研究显示其他水域如宜兴养殖基地的背角无齿蚌中 Ni-Mn、Cr-Co 及 Cu-Cd 之间呈显著正相关($P < 0.05$), 太湖三山岛水域野生蚌 Cr-Mn、Cr-Ni 和 Cr-Cd 之间呈显著正相关($P < 0.05$), 与本研究中蚌的重金属相关性差异甚大。提示背角无齿蚌体内重金属积累的相关性与机体自身调节关系微弱, 而主要受到外界水环境重金属背景含量的影响。

此外, 南泉基地、梅梁湾和茈碧湖蚌样中分别有 6 对、20 对和 5 对重金属之间呈正相关(表 4), 这与三水域的污染程度相匹配(表 2)。El-Moselhy 等^[35]研究也发现相同的趋势, 靠近污染源处的波纹巴非蛤(*Paphia undulate*)体内有 36 对重金属(Pb-Cd、Cu-Cd、Cu-Pb、Zn-Cd、Zn-Pb、Zn-Cu、Ni-Cd、Ni-Pb、Ni-Cu、Ni-Zn、Co-Cd、Co-Pb、Co-Cu、Co-Zn、Co-Ni、Cr-Cd、Cr-Pb、Cr-Cu、Cr-Zn、Cr-Ni、Cr-Co、Mn-Cd、Mn-Pb、Mn-Cu、Mn-Zn、Mn-Ni、Mn-Co、Mn-Cr、Fe-Cd、Fe-Pb、Fe-Cu、Fe-Zn、Fe-Ni、Fe-Co、Fe-Cr、Fe-Mn)含量之间呈显著正相关, 而远离污染源处的加夫蛤(*Gafrarium pectinatum*)体内只有 18 对重金属之间呈显著相关(Cd-Pb、Cd-Ni、Cd-Co、Pb-Co、Cu-Zn、Cu-Ni、Cu-Co、Cu-Fe、Zn-Cr、Ni-Co、Ni-Cr、Ni-Mn、Co-Fe、Cr-Mn、

表 3 不同水域背角无齿蚌重金属含量的比较($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 干重)

Table 3 Comparison of mean metal concentrations($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ dry weight) in soft tissues of *Anodonta woodiana* from different geographical areas

种类/地点	壳长/cm	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Ag	Cd	Pb	参考文献
南泉基地	10.4	0.3	1680	342	nd	nd	4.8	140	4.1	0.02	nd	0.1	0.7	本研究
梅梁湾	10.5	0.8	6422	1925	nd	1.8	8.0	400	5.9	0.2	nd	1.4	2.1	本研究
茈碧湖	12.3	2.0	1726	2379	nd	nd	nd	149	1.5	1.3	nd	nd	nd	本研究
五里湖	13.9						13*	418*	5.9*			0.4*	1.1*	[4]
宜兴养殖基地	9.9	0.09	13415	2418	0.8	0.8	6.4					1.0		[12]
太湖三山岛水域	10.2	nd	11237	4287	nd	nd	19	1252	15	0.3	0.5	22	2.8	[6]
太湖漫山水域	11.1	nd	5921	2069	nd	nd	18	677	12	0.7	0.3	23	0.1	[6]
太湖湖州水域	9.7	nd	11886	1977	nd	nd	0.4	661	12	0.1	nd	0.1	nd	[6]
太湖大浦水域	9.3	nd	8328	1386	nd	nd	8.1	912	15	0.2	0.6	2.5	nd	[6]
波兰 Licheńskie 湖			4400	1050			160	550				0.6	4~6	[25]
波兰 Licheński 河			3000	1000			300	580				0.6	4~6	[25]

注: nd, 未检出; * 由湿重浓度根据含水率转化为干重浓度。

Cr-Fe、Mn-Fe 之间正相关,Mn-Pb、Mn-Zn 之间负相关)。这可能是由于污染越严重的水域,生活在其中的贝类就越有可能积累到相同数量级含量的重金属。进一步揭示背角无齿蚌积累重金属相关性的复杂程度与水环境的污染程度具有共同的变化趋势。

3 结论

(1)背角无齿蚌体内重金属的积累水平与周围水环境中重金属污染程度呈正相关,在洁净水体养殖或繁育的背角无齿蚌应该可以控制其体内环境重金属

表 4 背角无齿蚌重金属之间 Pearson 相关系数
Table 4 Pearson rank correlation coefficient of heavy metals in soft tissues of *Anodonta woodiana*

南泉基地	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Ba	Tl	Pb
Al	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	+	ns	ns	ns
Cr		ns	ns	ns	ns	ns	ns	+	ns	ns	ns	ns
Mn			ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Fe				ns	ns	+	ns	ns	+	ns	ns	+
Ni					ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Cu						ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Zn							ns	ns	ns	ns	ns	+
As								ns	ns	ns	ns	ns
Mo									ns	ns	ns	ns
Cd										ns	ns	ns
Ba											ns	ns
Tl												ns

梅梁湾	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Ba	Tl	Pb
Al	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Cr		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Mn			ns	ns	+	+	ns	+	+	ns	ns	+
Fe				+	+	ns	ns	ns	+	ns	ns	+
Ni					+	ns	ns	ns	ns	ns	ns	+
Cu						ns	ns	+	+	ns	ns	+
Zn							ns	+	+	ns	ns	+
As								ns	ns	ns	ns	ns
Mo									+	ns	ns	+
Cd										ns	ns	+
Ba											ns	ns
Tl												ns

苕碧湖	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Ba	Tl	Pb
Al	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Cr		ns	+	ns	ns	ns	+	ns	ns	ns	ns	ns
Mn			ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	+	ns	ns
Fe				ns	ns	ns	ns	+	ns	ns	ns	ns
Ni					ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Cu						ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Zn							ns	ns	ns	ns	ns	ns
As								ns	ns	ns	ns	ns
Mo									ns	+	ns	ns
Cd										ns	ns	ns
Ba											ns	ns
Tl												ns

注:+,正相关;*P<0.05,**P<0.01;ns,相关性不显著。

积累在较低的水平。

(2)南泉基地养殖蚌重金属背景含量较低,接近于高原洁净水体同种蚌类的重金属含量水平,提示移植南泉基地养殖的背角无齿蚌对自然水体进行主动监测是可行的。梅梁湾野生蚌重金属 Al、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Ba 和 Pb 的含量较高,表明该水域重金属污染趋势明显。首次评价高原洁净湖泊苕碧湖的重金属水平,结果显示 Al、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Ba 和 Pb 含量很低,但 Mo 和 Tl 的含量相对较高。

(3)背角无齿蚌重金属积累的相关性与机体自身调节关系微弱,而主要受到外界水环境重金属背景含量的影响,并且相关性的复杂程度与水环境的污染程度具有共同的变化趋势。

参考文献:

- [1] Goldberg E D. The Mussel Watch: A first step in global marine monitoring[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1975, 6: 111.
- [2] Camusso M, Balestrini R, Muriano F, et al. Use of freshwater mussel *Dreissena polymorpha* to assess trace metal pollution in the Lower River Po (Italy) [J]. *Chemosphere*, 1994, 29: 729–745.
- [3] Yang J, Harino H, Liu H, et al. Monitoring the organotin contamination in the Taihu Lake of China by Bivalve mussel *Anodonta woodiana* [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2008, 81: 164–168.
- [4] 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.
YANG Jian, WANG Hui, ZHU Hong-yu, et al. Bioaccumulation of heavy metals in *Anodonta woodiana* from Wulihu Area of Taihu Lake [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14 (3): 362–366.
- [5] 刘洪波, 杨 健, 甘居利. 太湖五里湖水域背角无齿蚌中汞的残留[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(2): 411–415.
LIU Hong-bo, YANG Jian, GAN Ju-li. Residues of mercury in the bivalve mussels *Anodonta woodiana* from the Wulihu Area of the Taihu, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(2): 411–415.
- [6] Liu H, Yang J, Gan J. Trace element accumulation in bivalve mussels *Anodonta woodiana* from Taihu lake, China [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2010, 59: 593–601.
- [7] SFEI. 1996 annual report: San Francisco estuary regional monitoring program for trace substances[R]. San Francisco Estuary Institute, Richmond, CA, 1997.
- [8] Bervoets L, Voets J, Smolders R, et al. Metal accumulation and condition of transplanted zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) in metal polluted rivers [J]. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 2005, 8(4): 451–460.
- [9] Metcalfe-Smith J L, Green R H, Grapentine L C. Influence of biological factors on concentrations of metals in the tissues of freshwater mussels (*Elliptio complanata* and *Lampsilis radiata*) from the St. Lawrence River [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1996, 53: 205–219.
- [10] Andral B, Thebault H, Boissery P. Monitoring chemical contamination levels in the Mediterranean based on the use of mussel caging [J]. *Rapport de la Commission Internationale Pour la Mer Méditerranée*, 2007, 38: 226.
- [11] Sunlu U. Comparison of heavy metals in native and cultured mussel *Mytilus galloprovincialis* (L., 1758) from the Bay of Izmir (Aegean Sea/Turkey). Mediterranean Mussel Watch – Designing a regional program for detecting radionuclides and trace-contaminants [M]. CIESM Workshop Series, Monaco, 2002: 101–103.
- [12] 杨 健, 曲疆奇, 刘洪波. 野生及养殖背角无齿蚌中重金属的生物积累特征 [J]. 生态环境学报, 2010, 19(3): 570–575.
YANG Jian, QU Jiang-qi, LIU Hong-bo. Characteristics of element bioaccumulation between farmed and wild swan mussels *Anodonta woodiana* [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(3): 570–575.
- [13] Lukashev D V. Accumulation of heavy metals by *Anodonta anatina* (L.) in the place of household sewage release in the river ecosystem [J]. *Hydrobiological Journal*, 2010, 46: 67–77.
- [14] 朱 喜, 张扬文. 梅梁湖水污染现状及防治对策 [J]. 水资源保护, 2002, 4: 28–30.
ZHU Xi, ZHANG Yang-wen. Pollution situation and countermeasures of aquatic environment of Meiliang Bay, Taihu Lake [J]. *Journal of Water Resources Protection*, 2002, 4: 28–30.
- [15] Qiao M, Wang C, Huang S, et al. Composition, sources, and potential toxicological significance of PAHs in the surface sediments of the Meiliang Bay, Taihu Lake, China [J]. *Environment International*, 2006, 32: 28–33.
- [16] 张 敏, 蔡庆华, 唐 涛, 等. 洱海流域湖泊大型底栖动物群落结构及空间分布 [J]. 生态学杂志, 2011, 30(8): 1696–1702.
ZHANG Min, CAI Qing-hua, TANG Tao, et al. Macrobenthos community structure and its spatial distribution in Erhai watershed lakes [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(8): 1696–1702.
- [17] Chen X B, Yang J, Liu H B, et al. Element concentrations in a Unionid mussel (*Anodonta woodiana*) at different life stages [J]. *Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University*, 2012, 57(1): 139–144.
- [18] Usero J, González-Regalado E, Gracia I. Trace metals in the bivalve molluscs *Ruditapes decussatus* and *Ruditapes philippinarum* from the Atlantic coast of southern Spain [J]. *Environment International*, 1997, 23: 291–298.
- [19] Usero J, Morillo J, Gracia I. Heavy metal concentrations in molluscs from the Atlantic coast of southern Spain [J]. *Chemosphere*, 2005, 59: 1175–1181.
- [20] Ravera O, Cenci R, Beone G M, et al. Trace element concentrations in freshwater mussels and macrophytes as related to those in their environment [J]. *Journal of Limnology*, 2003, 62: 61–70.
- [21] Wang W X, Fisher N S. Assimilation of trace elements and carbon by the mussel *Mytilus edulis*: Effects of food composition [J]. *Limnology and Oceanography*, 1996, 41(2): 197–207.
- [22] Pernice M, Boucher J, Boucher-Rodoni R. Comparative bioaccumula-

- tion of trace elements between *Nautilus pompilius* and *Nautilus macromphalus* (Cephalopoda: Nautiloidea) from Vanuatu and New Caledonia[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72:365–371.
- [23] 夏天翔, 刘雪华, 赵孟彬. 2种淡水蚌类对水环境中 Cu、Zn 和 Cd 的去除与累积[J]. 水产科学, 2009, 28(4):183–187.
- XIA Tian-xiang, LIU Xue-hua, ZHAO Meng-bin. The clearance and accumulation of Cu, Zn and Cd from water by the freshwater mussels (*Anodonta woodiana* and *Hyriopsis cumingii*) [J]. *Fisheries Science*, 2009, 28(4):183–187.
- [24] 李 威, 杨 健, 陈修报, 等. 背角无齿蚌组织中的元素分布研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(3):597–603.
- LI Wei, YANG Jian, CHEN Xiu-bao, et al. The distribution of elements in the tissues of mussel *Anodonta woodiana*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(3):597–603.
- [25] Królak E, Zdanowski B. The bioaccumulation of heavy metals by the mussels *Anodonta woodiana* (Lea, 1834) and *Dreissena polymorpha* (Pall.) in the heated Konin lakes[J]. *Archives of Polish Fisheries*, 2001, 9:229–237.
- [26] Benedicto J, Andral B, Martínez-Gómez C, et al. A large scale survey of trace metal levels in coastal waters of the Western Mediterranean basin using caged mussels (*Mytilus galloprovincialis*) [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2011, 13:1495–1505.
- [27] Qu W, Dickman M, Wang S. Multivariate analysis of heavy metal and nutrient concentrations in sediments of Taihu Lake, China[J]. *Hydrobiologia*, 2001, 450:83–89.
- [28] 蒋 咏, 孙淑云. 直湖港水环境综合整治探讨[J]. 中国水利, 2009, 23:35–38.
- JIANG Yong, SUN Shu-yun. Water environment improvement of Zhi-hugang River[J]. *China Water Resources*, 2009, 23:35–38.
- [29] 杨松年. 中国南部泥盆纪生物-沉积环境与金属矿产的区域分布[J]. 地质与勘查, 1981, 4:6–11.
- YANG Song-nian. Biology-depositional environment of devonian and the regional distribution of metal ores in southern China[J]. *Geology and Prospecting*, 1981, 4:6–11.
- [30] 陈 进, 韩润生, 高德荣, 等. 云南会泽铅锌矿床地质特征及找矿方法模式[J]. 地质地球化学, 2001, 29(3):124–129.
- CHEN Jin, HAN Run-sheng, GAO De-rong, et al. Geological characteristics of Huize Pb-Zn deposit, Yunnan and model of ore-prospecting method[J]. *Geology-Geochemistry*, 2001, 29(3):124–129.
- [31] 木村修一, 左右田健次. 微量元素と生体[M]. 東京:秀潤社, 1987.
- [32] Naimo T J. A review of the effects of heavy metals on freshwater mussels[J]. *Ecotoxicology*, 1995, 4:341–362.
- [33] 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.
- [34] Pourang N, Tanabe S, Rezvani S, et al. Trace elements accumulation in edible tissues of five sturgeon species from the Caspian Sea[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2005, 100:89–108.
- [35] El-Moselhy K M, Yassien M H. Accumulation patterns of heavy metals in venus clams, *Paphia undulate* (Born, 1780) and *Gafrarium pectinatum* (Linnaeus, 1758), from Lake Timsah, Suez Canal, Egypt[J]. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 2005, 31(1):13–28.