

基于“标准化”背角无齿蚌 (*Anodonta woodiana*) 对太湖五里湖重金属污染的主动监测*

陈修报, 苏彦平, 刘洪波, 杨 健**

(中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 内陆渔业生态环境与资源重点开放实验室, 无锡 214081)

摘 要: 将人工繁育的“标准化”背角无齿蚌 (*Anodonta woodiana*) 移殖至太湖五里湖, 并以仍养殖在未受污染的中国水产科学研究院淡水渔业研究中心南泉基地的同批蚌作为对照, 进行为期 9 个月的主动监测研究. 每 3 个月回收一次蚌样, 应用电感耦合等离子质谱仪 (ICP-MS) 测定 15 种重金属 (Al、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Mo、Ag、Cd、Ba、Tl 和 Pb) 的含量. 结果表明, 南泉基地对照组和五里湖移殖组的蚌样对重金属均产生了明显的生物积累. 培养 3 个月的五里湖移殖组蚌样中 As 的含量显著高于同期南泉基地对照组, 而前者 Mn、Fe、Zn 和 Ba 含量显著低于后者; 培养 6 个月的五里湖移殖组蚌样中 Al 和 Pb 的含量显著低于同期南泉基地对照组; 培养 9 个月的五里湖移殖组蚌样中 Pb 含量显著低于同期南泉基地对照组. 然而, 南泉基地对照组和五里湖移殖组蚌样中重金属 (Cr、Cu、As、Cd 和 Pb) 含量均低于我国及国际上的相关标准. 培养 3、6 和 9 个月的南泉基地对照组及五里湖移殖组蚌样的重金属污染指数分别为 1.8、1.8、2.4、2.1 和 8.3、16.8, 均值综合污染指数分别为 0.0218、0.0289、0.0337、0.0218 和 0.0560、0.0732, 属于正常背景水平, 并且两水体蚌样的重金属污染指数和均值综合污染指数无显著差异, 提示五里湖和南泉基地均未受到明显的重金属污染.

关键词: “标准化”背角无齿蚌; 主动监测; 重金属; 生物积累; 太湖五里湖

Active biomonitoring of heavy metal pollution level of Wulihu area, Lake Taihu using “standardized” *Anodonta woodiana*

CHEN Xiubao, SU Yanping, LIU Hongbo & YANG Jian

(Key Open Laboratory of Ecological Environment and Resources of Inland Fisheries, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, P. R. China)

Abstract: A group of artificially propagated “standardized” *Anodonta woodiana* mussels were transplanted to Wulihu area of Lake Taihu for assessing the spatial and temporal trends of heavy metal pollution. Meanwhile, the same batch mussels were continually reared in an unpolluted pond of Nanquan Aquatic Base of Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences as a control group. The period of active biomonitoring by transplantation was over 9 months. Mussels from the transplanted and control groups were recollected, respectively, every 3 months to determine heavy metal (Al, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Ag, Cd, Ba, Tl, and Pb) concentrations using an ICP-MS. The results showed that metal bioaccumulation were presented in both control and transplanted mussels. Arsenic concentration in mussels transplanted to Wulihu area for 3 months was significantly higher than that of control mussels in Nanquan Aquatic Base for 3 months, while concentrations of Mn, Fe, Zn, and Ba in the former were significantly lower than those of the latter; concentrations of Al and Pb in mussels transplanted to Wulihu area for 6 months were significantly lower than those of the same period control mussels of Nanquan Aquatic Base; and Pb concentration in mussels transplanted to Wulihu area for 9 months were significantly lower than that of the same period control mussels. However, concentrations of heavy metals (Cr, Cu, As, Cd, and Pb) in both control mussels and transplanted mussels were obviously lower than national and international limits. In addition, metal pollution indexes (*MPI*) of control mussels for 3, 6 and 9 months were 1.8, 2.4, and 8.3, respectively, and those of transplanted mussels were 1.8, 2.1, and 16.8, respectively. The *MPI* levels of

* 国家自然科学基金项目(31072214)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2013JBF05)联合资助. 2013-12-26 收稿; 2014-02-24 收修改稿. 陈修报(1983~), 男, 博士, 助理研究员; E-mail: chenxb@ffrc.cn.

** 通信作者; E-mail: jiany@ffrc.cn.

them were consistent. Meanwhile, average synthetically pollution index of control mussels for 3, 6 and 9 months were 0.0218, 0.0337, and 0.0560, respectively, and those of transplanted mussels were 0.0289, 0.0218, and 0.0732, respectively. Their levels of average synthetically pollution index were without significantly different. The results indicated that the background concentrations of heavy metals in Wulihu area and Nanquan Aquatic Base were in the same levels, and both aquatic environments seemed to be without obvious metal pollution.

Keywords: “Standardized” *Anodonta woodiana*; active biomonitoring; heavy metal; bioaccumulation; Wulihu area of Lake Taihu

太湖是我国第三大淡水湖泊,水面面积为 2338 km²,在工业、农业和生活用水以及渔业方面发挥着重要作用。五里湖系其北部的湖湾,东西长 6 km,南北宽 0.3 ~ 1.5 km,面积约 6.4 km²,曾是太湖污染最严重的水域^[1]。关于太湖污染的研究主要集中于水体富营养化^[2],而对于我国目前凸显的水体重金属污染的报道则较少。值得注意的是,重金属污染在太湖特别是北部湖湾中日益明显^[3]。因此,对重金属污染动态的监测和早期预警尤为必要。

贝类因具有定居生活、对污染物的高富集性和低代谢性、体内积累污染物含量与水体中污染物的平均含量简单相关等特点,被认为是监测和评价水环境污染的理想指示生物^[4]。Benedicto 等^[5]通过移殖紫贻贝 (*Mytilus galloprovincialis*) 有效地监测了地中海不同水域的重金属污染水平。然而,在淡水环境开展基于贝类的主动监测研究甚少。背角无齿蚌 (*Anodonta woodiana*) 是我国的常见种类,在全球广泛分布,不仅是传统的水产品,而且作为“淡水贝类观察”研究体系的指示生物已成功监测太湖有机锡^[6]、有机氯^[7]和重金属^[8-9]的污染水平。可是依赖于采集野生蚌的被动监测面临着样本规格/年龄不一、生存水域营养条件差异较大、污染暴露史不同、在某些水域没有样本可采等难题^[10]。针对相关问题,本课题组在证实了移殖洁净水体养殖的背角无齿蚌对水环境重金属污染进行主动监测可行性的基础上^[11-12],应用人工繁育技术开发出了具有生物因子相同、遗传质量稳定、污染本底值较低、可向待测水域移殖和回捕等特点的“标准化”的监测专用背角无齿蚌(简称“标准化”背角无齿蚌)。本研究基于“标准化”背角无齿蚌做了长期的主动监测研究,将其移殖到太湖五里湖,并同时以仍养殖在未受污染的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)^[11]池塘中的同批蚌作为对照,以期了解蚌在不同水体中对重金属的积累动态以及监测五里湖重金属污染状况。

1 材料与方法

1.1 主动监测技术

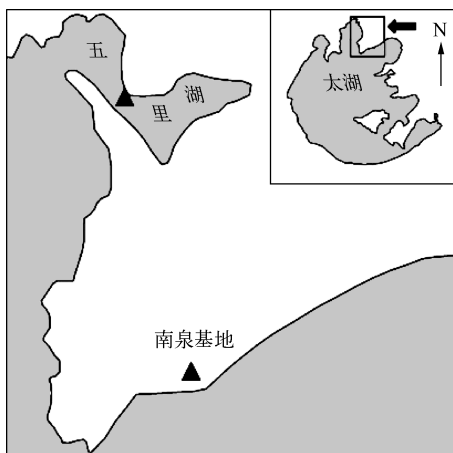


图1 “标准化”背角无齿蚌的移殖位点
Fig. 1 Sketch map of “standardized”
Anodonta woodiana transplanted

2010年9月将“标准化”背角无齿蚌(1+龄)置于养殖网箱(60 cm × 40 cm × 10 cm)中,每个网箱50只,移殖到太湖五里湖水域(31°31′6″N, 120°14′30″E),并以南泉基地养殖池塘(31°25′42″N, 120°16′51″E)的同批蚌作为对照(图1)。蚌的重金属背景值很低,应用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS; 7500ce型,美国Agilent公司)分析同年7月份蚌样:Cr和Ni平均含量分别仅为2.6和0.7 μg/g(dw)(dw代表干重,fw代表鲜重),As、Cu、Tl和Pb均未检出(检测限为0.001 μg/g^[13])(n=4)。为了避免空气和水界面受到大气沉降物的影响及底质和水界面受到风浪搅动底泥的干扰,本研究通过浮子控制网箱悬挂深度,保持蚌始终位于水面下50 cm。进行为期9个月的重金属积累动态的比较研究,并每3个月采集一次各组蚌样,置于曝气的自来水中暂养72 h以排出肠道内容物,然后置于冰箱中-20℃冷冻保存。实验共设置6个组,分别为:CN3:3个月南泉对照组;TW3:3个月五里湖移殖组;CN6:6个月南泉对照组;TW6:6个月五里湖移殖组;CN9:9个

月南泉对照组;TW9:9个月五里湖移殖组.各组背角无齿蚌的生物学特征见表1.

表1 “标准化”背角无齿蚌的生物学特征
Tab.1 Biological characteristic of “standardized” *Anodonta woodiana*

组别	样本数 <i>n</i>	采集时间	回捕间隔/ 月	壳长/ mm	壳宽/ mm	壳高/ mm	软组织/ g(fw)	软组织/ g(dw)	含水率/ %
CN3	10	2010年12月	3	64.0±2.3	24.2±1.7	39.2±2.2	9.2±1.1	0.7±0.2	92.6±1.3
TW3	10	2010年12月	3	60.6±2.5	23.2±1.8	38.3±2.0	11.8±1.9	1.4±0.3	88.5±1.5
CN6	10	2011年3月	6	62.2±1.3	22.9±1.1	38.4±1.0	10.1±1.6	1.0±0.3	90.7±1.9
TW6	10	2011年3月	6	59.9±2.8	23.2±1.7	38.5±2.3	12.4±2.5	1.3±0.3	89.7±1.2
CN9	10	2011年6月	9	61.8±1.4	23.3±1.3	38.5±1.3	8.5±1.0	0.4±0.1	94.8±0.8
TW9	10	2011年6月	9	58.0±2.3	22.4±1.1	37.6±1.8	8.0±2.0	0.6±0.2	93.1±1.5

1.2 重金属测定

将蚌样置于室温下解冻,然后用 Milli-Q 水清洗样本 6 遍,放入 80℃ 烘箱中干燥 24 h 至恒重,并将干燥后的样本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^[14]的方法,即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(德国 Merck 公司),用微波消解仪(ETHOS A T260 型,意大利 Milestone 公司)进行彻底消解(10 min,120℃;15 min,170℃;再次 15 min,170℃),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 ICP-MS 同时测定 15 种重金属(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%~101.7%.

1.3 统计分析与污染评价方法

所得数据运用 SPSS 16.0 统计软件分析.应用 One-Way ANOVA 和 Wilcoxon 符号平均秩检验比较重金属含量的差异性, $P < 0.05$ 表示差异水平显著.此外,采用重金属污染指数(MPI)^[15]和重金属残留量指数(I)^[16]评价重金属的污染水平:

$$MPI = (C_{n1} \cdot C_{n2} \cdots C_{nn})^{1/n} \quad (1)$$

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

式中, C_{in} 是指样本中第 n 种重金属的平均含量; C_i 为样本中 i 类重金属实测值; $C_{s,i}$ 为 i 类重金属允许残留量,其中,Cr 和 As(无机)的评价标准按照 GB/T 2762-2005^①分别为 2.0 和 0.5 μg/g,Cu、Cd 和 Pb 的评价标准按照 NY 5073-2006^②分别为 50、1.0 和 1.0 μg/g.由于目前我国食品/水产品上还没有 Al、Mn、Fe、Co、Ni、Zn、Mo、Ag、Ba 和 Tl 的限量标准,因此它们不计入.

2 结果与讨论

2.1 重金属含量的变化

从时间上看,培养 6 个月的南泉对照组(CN6)蚌样中 Al 的含量较培养 3 个月的南泉对照组(CN3)的显著增加($P < 0.05$);培养 9 个月的南泉对照组(CN9)蚌样中 Zn、As、Ba 和 Pb 的含量较 CN3 组的显著增加($P < 0.05$),而 Mn、Zn、As、Ba 和 Pb 含量较 CN6 组显著增加($P < 0.05$).培养 6 个月的五里湖移殖组(TW6)蚌样中所有重金属含量与培养 3 个月的五里湖移殖组(TW3)无显著差异($P > 0.05$);培养 9 个月的五里湖移殖组(TW9)蚌样中 Mn、Fe、Zn、As、Ba 和 Tl 的含量较 TW3 组显著增加($P < 0.05$),而 Mn、Fe、Zn、As 和 Ba 的含量较 TW6 组显著增加($P < 0.05$)(表 2).

从不同位点来看,TW3 组蚌样中 As 的含量显著高于 CN3 组($P < 0.05$),而前者 Mn、Fe、Zn 和 Ba 的含量

① 中华人民共和国卫生部.食品中污染物限量,2005.

② 中华人民共和国农业部.无公害食品——水产品中有毒有害物质限量,2006.

显著低于后者 ($P < 0.05$); TW6 组蚌样中 Al 和 Pb 的含量显著低于 CN6 组 ($P < 0.05$), 其它重金属的含量无显著差异 ($P > 0.05$); TW9 组蚌样中 Pb 的含量显著低于 CN9 组 ($P < 0.05$), 而其余重金属含量无显著差异 ($P > 0.05$).

表 2 “标准化”背角无齿蚌软组织中重金属的含量 ($\mu\text{g/g(dw)}$) *
Tab. 2 Concentrations of heavy metals in soft tissues of transplanted and controlled
“standardized” *Anodonta woodiana* ($\mu\text{g/g(dw)}$)

重金属	CN3	TW3	CN6	TW6	CN9	TW9
Al	25 ± 11	62 ± 30	68 ± 24	18 ± 5.6	37 ± 15	53 ± 50
Cr	1.5 ± 0.2	1.5 ± 0.2	1.4 ± 0.5	1.5 ± 0.4	1.0 ± 1.2	2.4 ± 0.3
Mn	6051 ± 1667	3146 ± 753	4260 ± 1455	3338 ± 506	9326 ± 2906	5886 ± 1349
Fe	2367 ± 626	1196 ± 322	1708 ± 761	1422 ± 263	2973 ± 1936	2444 ± 451
Ni	nd	nd	nd	nd	0.8 ± 1.3	1.8 ± 1.1
Cu	nd	nd	nd	0.07 ± 0.2	nd	1.0 ± 1.2
Zn	312 ± 68	201 ± 32	290 ± 65	214 ± 27	519 ± 115	377 ± 83
As	0.06 ± 0.1	0.6 ± 0.4	0.6 ± 0.5	0.6 ± 0.4	4.0 ± 2.3	4.9 ± 0.6
Mo	1.6 ± 1.0	1.6 ± 0.2	1.5 ± 0.2	1.4 ± 0.04	1.7 ± 2.4	4.8 ± 0.3
Cd	nd	nd	0.004 ± 0.01	nd	0.1 ± 0.2	0.09 ± 0.2
Ba	803 ± 187	412 ± 90	540 ± 173	424 ± 60	1275 ± 364	742 ± 174
Tl	0.2 ± 0.02	0.3 ± 0.2	0.2 ± 0.03	0.2 ± 0.006	0.7 ± 0.8	1.9 ± 0.2
Pb	0.7 ± 0.5	0.3 ± 0.3	0.9 ± 0.4	0.1 ± 0.2	3.4 ± 1.9	2.3 ± 0.3
MPI	1.8	1.8	2.4	2.1	8.3	16.8

* Co 和 Ag 在所有样本中均未检出,故不列入计算;nd 表示未检出.

重金属在贝类体内的积累是吸收与释放的动态平衡. 积累的主要途径包括从食物网摄取、鳃从过滤的水体中吸收溶解态金属以及水体中重金属的渗透作用^[17-18]. 然而, 贝类对重金属的释放速率非常低, 通常情况下每天的排出率仅有 1% ~ 3%^[19]. 本研究发现, 南泉基地对照组蚌样中的 Al、Mn、Zn、As、Ba 和 Pb 含量, 以及五里湖移殖组蚌样中的 Mn、Fe、Zn、As、Ba 和 Tl 含量表现出显著增加, 提示它们随着时间的增长在蚌体内有生物积累的现象. 背角无齿蚌对重金属具有较高的积累能力. 前人的研究也能够引证这一点, 如背角无齿蚌对 Cu、Zn 和 Cd 的吸收率分别是三角帆蚌 (*Hyriopsis cumingii*) 的 1.2、1.9 和 1.5 倍^[20]; 在相同的生境中, 其软组织中 Mn、Fe、Cu、Zn 和 Cd 的含量分别是斑马贻贝 (*Dreissena polymorpha*) 的 71、3、7.6 和 3 倍^[21]. 值得注意的是, 本研究中“标准化”背角无齿蚌经历了 9 个月的时间和不同的季节, 但在两水域中重金属含量均未出现显著降低. 这不同于紫贻贝 (*Mytilus edulis*) 中重金属的积累会明显受到时间/季节的影响: 冬季和春季含量增加, 而夏季明显降低, 如其消化腺中 As、Cu、Fe、Mn、Pb 和 Zn 的含量在春季到夏季的过程中不断下降^[22], Regoli 认为这主要与繁殖季节紫贻贝排放配子有关^[22]. 背角无齿蚌一般 3 龄达到性成熟, 并在春末和夏季排放钩介幼虫, 我们之前的研究表明其钩介幼虫中 Al、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As 和 Mo 的平均含量分别为 60、0.5、417、180、0.9、17、78、5.0 和 0.02 $\mu\text{g/g(dw)}$ ^[14]. 在移殖“标准化”背角无齿蚌进行主动监测过程中最好选择未成熟阶段的幼蚌, 以避免繁殖季节对其重金属积累的影响, 从而更灵敏地评价水环境的重金属污染时间动态特征.

移殖蚌类对淡水环境重金属的主动监测, 突破了以往基于贝类的生物监测依赖于野生资源的局限, 并取得了一系列阶段性的研究进展^[12,23]. 本研究显示不同水体的“标准化”背角无齿蚌中一些重金属含量表现出显著差异. 其中, 五里湖移殖组蚌样中 As 的含量较高, 而南泉基地对照组蚌样中 Mn、Fe、Zn、Ba 和 Pb 的含量较高. 杨健等^[8]也曾指出五里湖底泥中 As 污染明显. 然而, 自五里湖进行了控制外源、生态清淤、调水、生态修复、退渔还湖、水域封闭管理、建设生态护岸和滨水区等综合治理以后, 水质已明显好转^[24]. 与 2003 年五里湖背角无齿蚌中重金属 Zn、Cu、As、Cd 和 Pb 的含量分别为 418、13、5.9、0.4 和 1.1 $\mu\text{g/g(dw)}$ (根据含水率由湿重浓度转换而来)^[8] 相比较, 五里湖移殖组除了 TW9 组蚌样中 Pb (2.3 $\mu\text{g/g(dw)}$) 的含量略高, 其

余重金属均明显低于之前的水平. 南泉基地“标准化”背角无齿蚌以养殖池塘中的天然饵料为食, 不进行额外的投饵, 因此推测蚌样中重金属的来源应该是养殖用水. 南泉基地采用循环水养殖, 虽不使用基地以外的水源, 但其它鱼类养殖池塘投喂的饲料所残留在水体中的重金属可能是蚌中重金属富集的主要来源. 涂杰峰等^[25]和 Maule 等^[26]研究表明水产饲料中重金属的含量超标明显, Pb、As(无机)、Cd、Cr 和 Ba 的含量分别为 0.05 ~ 3.52、≤5.4、0.08 ~ 3.05、1.28 ~ 20.46 和 0.2 ~ 15.3 $\mu\text{g/g}$, 存在重金属污染的风险. 尽管如此, 与我国及国际上的相关水产品等限量标准相比较, 五里湖移植组和南泉基地对照组蚌样中重金属(Cr、Cu、Zn、As、Cd、Pb)的含量仍比较低, 属于未污染水平(表 3).

表 3 “标准化”背角无齿蚌中重金属平均含量与中国及国际标准的比较*

Tab. 3 Comparison of average concentrations of toxic heavy metals in soft tissues of “standardized” *Anodonta woodiana* with national and international limits

		重金属含量/($\mu\text{g/g}$ (fw))				
		Cr	Cu	As	Cd	Pb
本研究	CN3	0.11	nd	0.004	nd	0.05
	TW3	0.17	nd	0.07	nd	0.03
	CN6	0.13	nd	0.06	0.0004	0.08
	TW6	0.15	0.007	0.06	nd	0.01
	CN9	0.05	nd	0.21	0.005	0.18
	TW9	0.17	0.07	0.34	0.006	0.16
国内标准	GB/T 2762—2005	2.0	—	0.5	—	—
	NY 5073—2006	—	50	—	1.0	1.0
国际标准	EC ^①	—	—	—	1.0	1.0
	FAO ^②	1.0	10 ~ 30	0.1 ~ 5.0	2.0	—

* nd 表示未检出.

2.2 重金属污染指标的变化

南泉基地对照组 CN3、CN6 和 CN9 蚌样的 *MPI* 分别为 1.8、2.4 和 8.3(表 2); 重金属 Cr、Cu、As(无机)、Cd 和 Pb 的 *I* 值分别为 0.0260 ~ 0.0651、0.00015 ~ 0.0720、0 ~ 0.0052 和 0.0518 ~ 0.1768, 对其取均值后 CN3、CN6 和 CN9 组蚌样的综合污染指数分别为 0.0218、0.0337 和 0.0560(表 4). 五里湖移植组 TW3、TW6 和 TW9 组蚌样的 *MPI* 分别为 1.8、2.1 和 16.8(表 2), Cr、Cu、As(无机)、Cd 和 Pb 的 *I* 值分别为 0.0773 ~ 0.0863、0 ~ 0.0014、0.0214 ~ 0.1170、0 ~ 0.0062 和 0.0103 ~ 0.1587, TW3、TW6 和 TW9 组蚌样相应的均值综合污染指数分别为 0.0289、0.0218 和 0.0732(表 4). 经 Wilcoxon 符号平均秩检验, CN3 与 TW3 组, CN6 与 TW6 组以及 CN9 与 TW9 组蚌样之间的 *MPI*、*I* 及均值综合污染指数之间的差异均不显著($P > 0.05$).

MPI 能够从总体上评价重金属的综合污染状况^[15]. 研究表明未受污染水体中养殖的背角无齿蚌的 *MPI* 为 1.8, 而历史上污染较为严重的水体中背角无齿蚌的 *MPI* 为 11.1^[11]. 本研究发现 CN3、TW3、CN6 和 TW6 组蚌样的 *MPI* 接近 1.8(表 2), 即反映出 2010 年 9 月—2011 年 3 月期间南泉基地和五里湖水体未受到明显的重金属污染. 此外, 虽然 CN9 和 TW9 组蚌样的 *MPI* 在 11.1 左右, 但接近于太湖漫山水域背角无齿蚌的 *MPI* 水平(14), 且明显低于太湖湖州、大浦和三山岛水域中背角无齿蚌的 *MPI* 水平(分别为 20、24 和 34)^[9]. 综上所述, 在 2011 年 3 月—2011 年 6 月期间南泉基地和五里湖的重金属含量依然处于较低水平.

I 和均值综合污染指数能够有效反映出生物体中重金属(特别是危害性较强的重金属)的污染程度. 一般认为, *I*、均值污染综合指数 < 0.2 可视为正常背景水平, 在 0.2 ~ 0.6 之间为轻污染水平, 在 0.6 ~ 1.0 之间为污染水平, 而 > 1.0 则为重污染水平^[28-29]. 本研究中 CN3、TW3、CN6、TW6、CN9 和 TW9 组蚌样的 *I* 值和均

① 欧盟委员会. 食品中污染物最大残留量, 2001.

② 世界粮农组织. 鱼类和水产品中有害物质限量, 1983.

值综合污染指数均小于 0.2 (表 4), 进一步表明南泉基地对照组和五里湖移植组蚌样的重金属含量较低, 相关污染不明显。

3 结论

本研究基于移植人工繁育的“标准化”背角无齿蚌对自然水体重金属的污染状况开展有效的长期主动监测, 结果表明:

1) “标准化”背角无齿蚌对重金属积累的时间动态受到水环境的影响。在 9 个月的研究过程中, 南泉基地对照组蚌样中 Al、Mn、Zn、As、Ba 和 Pb 以及五里湖移植组蚌样中 Mn、Fe、Zn、As、Ba 和 Tl 的含量表现出明显的生物积累, 但重金属 (Cr、Cu、As、Cd 和 Pb) 的含量仍低于我国及国际上的相关标准。

2) 移植“标准化”背角无齿蚌能够有效地主动监测水体重金属的污染状况。南泉基地对照组和五里湖移植组蚌样在培养 3、6 和 9 个月后的重金属污染指数均处于较低水平, 且重金属残留指数和均值综合污染指数都属于正常背景水平, 揭示太湖五里湖经过综合治理后水质明显改善, 五里湖和南泉基地水体均未受到明显的重金属污染。

表 4 “标准化”背角无齿蚌软组织中重金属残留量指数与均值综合污染指数
Tab. 4 Heavy metals residue index and average synthetical pollution index in soft tissues
of “standardized” *Anodonta woodiana*

组别	I_{Cr}	I_{Cu}	$I_{As(无机)}^*$	I_{Cd}	I_{Pb}	均值综合污染指数
CN3	0.0555	0	0.0015	0	0.0518	0.0218
TW3	0.0863	0	0.0239	0	0.0345	0.0289
CN6	0.0651	0	0.0193	0.0004	0.0837	0.0337
TW6	0.0773	0.0001	0.0214	0	0.0103	0.0218
CN9	0.0260	0	0.0720	0.0052	0.1768	0.0560
TW9	0.0828	0.0014	0.1170	0.0062	0.1587	0.0732

* $I_{As(无机)}$ 参考淡水贝类斑马贻贝软组织中无机砷含量占总砷的 17.3% [27] 计算而来。

4 参考文献

- [1] 顾 岗, 陆根法. 太湖五里湖水环境综合整治的设想. 湖泊科学, 2004, 16(1): 56-60.
- [2] 秦伯强. 太湖生态与环境若干问题的研究进展及其展望. 湖泊科学, 2009, 21(4): 445-455.
- [3] Zeng J, Yang L, Chen X *et al.* Spatial distribution and seasonal variation of heavy metals in water and sediments of Taihu Lake. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2012, 21(5): 1489-1496.
- [4] Van Hassel JH, Farris JL. A review of the use of unionid mussels as biological indicators of ecosystem health. In: Farris JL, Van Hassel JH eds. *Freshwater bivalve ecotoxicology*. CRC Press, Boca Raton, Florida, and SETAC Press, Pensacola, Florida, 2007: 19-49.
- [5] 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*). *Journal of Environmental Monitoring*, 2011, 13: 1495-1505.
- [6] Yang J, Harino H, Liu H *et al.* Monitoring the organotin contamination in the Taihu Lake of China by Bivalve mussel *Anodonta woodiana*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2008, 81: 164-168.
- [7] Bian X, Liu H, Gan J *et al.* HCH and DDT residues in bivalves *Anodonta woodiana* from the Taihu Lake, China. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009, 56: 67-76.
- [8] 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. 长江流域资源与环境, 2005, 14(3): 362-366.
- [9] Liu H, Yang J, Gan J. Trace element accumulation in bivalve mussels *Anodonta woodiana* from Taihu Lake, China. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2010, 59: 593-601.

- [10] Andral B, Stanisiere JY, Sauzade D *et al.* Monitoring chemical contamination levels in the Mediterranean based on the use of mussel caging. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, **49**: 412-704.
- [11] 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.农业环境科学学报,2013,**32**(5): 1060-1067.
- [12] 孙 磊,陈修报,苏彦平等.东湖移殖背角无齿蚌中重金属的含量变化.水生生物学报,2014,**38**(1):203-208.
- [13] Ravera O, Cenci R, Benone GM *et al.* Trace element concentrations in freshwater mussels and macrophytes as related to those in their environment. *Journal of Limnology*, 2003, **62**: 61-70.
- [14] Chen XB, Yang J, Liu HB *et al.* Element concentrations in a Unionid mussel (*Anodonta woodiana*) at different life stages. *Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University*, 2012, **57**(1): 139-144.
- [15] Usero J, Morillo J, Gracia I. Heavy metal concentrations in molluscs from the Atlantic coast of southern Spain. *Chemosphere*, 2005, **59**: 1175-1181.
- [16] 杨婉玲,赖子尼,魏泰莉等.北江清远段水产品中铅含量调查.淡水渔业,2007,**37**(3):67-69.
- [17] Wang WX, Fisher NS. Assimilation of trace elements and carbon by the mussel *Mytilus edulis*: effects of food composition. *Limnology and Oceanography*, 1996, **41**(2): 197-207.
- [18] Pernice M, Boucher J, Boucher-Rodoni R. Comparative bioaccumulation of trace elements between *Nautilus pompilius* and *Nautilus macromphalus* (Cephalopoda: Nautiloidea) from Vanuatu and New Caledonia. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, **72**: 365-371.
- [19] Wang WX. Metal bioaccumulation in bivalve mollusks; recent progress. In: Villalba A, Reguera B, Romalde JL *et al* eds. Molluscan shellfish safety. Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO and Conselleria de Pesca e Asuntos Maritimos da Xunta de Galicia. Santiago de Compostela, Spain, 2003: 503-520.
- [20] 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.水产科学,2009,**28**(4):183-187.
- [21] Krolak E, Zdanowski B. The bioaccumulation of heavy metals by the mussels *Anodonta woodiana* (Lea, 1834) and *Dreissena polymorpha* (Pall.) in the heated Konin lakes. *Archives of Polish Fisheries*, 2001, **9**: 229-237.
- [22] Regoli F. Trace metals and antioxidant enzymes in gills and digestive gland of the Mediterranean mussel *Mytilus galloprovincialis*. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1998, **34**: 48-63.
- [23] 刘洪波,尤 洋,戈贤平等.池塘养殖及野外移殖三角帆蚌元素积累的差异.生态与农村环境学报,2009,**25**(2): 107-112.
- [24] 朱 喜,张扬文.五里湖水污染治理现状及继续治理对策.水资源保护,2009,**25**(1):86-89.
- [25] 涂杰峰,罗 钦,伍云卿等.福建水产饲料重金属污染研究.中国农学通报,2011,**27**(29):76-79.
- [26] Maule AG, Gannam AL, Davis JW. Chemical contaminants in fish feeds used in federal salmonid hatcheries in the USA. *Chemosphere*, 2007, **67**: 1308-1315.
- [27] Šlejkovec Z, Byrne AR, Smodiš B *et al.* Preliminary studies on arsenic species in some environmental samples. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 1996, **354**: 592-595.
- [28] 贾晓平,林 钦,李纯厚等.广东沿海牡蛎体Pb含量水平及时空变化趋势.水产学报,2000,**24**(6):527-532.
- [29] 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.中国环境科学,2011,**31**(8): 1383-1389.