

背角无齿蚌和背瘤丽蚌中20种元素的积累特征

陈修报, 姜涛, 刘洪波, 杨健

引用本文:

陈修报, 姜涛, 刘洪波, 杨健. 背角无齿蚌和背瘤丽蚌中20种元素的积累特征[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(10): 2190–2197.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0397>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

镉对“标准化”背角无齿蚌的急性毒性及脂质过氧化和DNA损伤的影响

陈修报, 刘洪波, 苏彦平, 姜涛, 杨健

农业环境科学学报. 2017, 36(10): 1960–1967 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0430>

亚慢性铜暴露对背角无齿蚌鳃抗氧化系统的影响

林子根, 井维鑫, 王兰

农业环境科学学报. 2019, 38(6): 1233–1239 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1175>

铜对背角无齿蚌幼蚌的组织损伤效应研究

刘凯, 陈修报, 刘洪波, 姜涛, 杨健

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1183–1189 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1380>

镉对背角无齿蚌鳃和肝脏氧化损伤的影响

杨惠珍, 刘娜, 卫晓溪, 王兰

农业环境科学学报. 2017, 36(4): 651–656 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1291>

常规方法对新疆地方土壤元素空间分析及重金属风险评价

蒲佳, 马龙, 吉力力·阿不都外力, 刘文

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1166–1176 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1284>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈修报, 姜涛, 刘洪波, 等. 背角无齿蚌和背瘤丽蚌中20种元素的积累特征[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(10): 2190–2197.

CHEN X B, JIANG T, LIU H B, et al. Bioaccumulation characteristics of 20 elements between *Anodonta woodiana* and *Lamprotula leai*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(10): 2190–2197.

# 背角无齿蚌和背瘤丽蚌中20种元素的积累特征

陈修报, 姜涛, 刘洪波, 杨健\*

(中国水产科学院淡水渔业研究中心渔业微化学实验室, 江苏 无锡 214081)

**摘要:**为有效保护我国淡水贝类,应用电感耦合等离子质谱仪检测了资源量锐减的我国特有物种背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)和国家重点保护的背瘤丽蚌(*Lamprotula leai*)中必需元素(常量元素:Na、Mg、K、Ca;微量元素:Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Se、Mo)和非必需/有毒元素(Al、As、Sr、Cd、Ba、Tl、Pb)的含量,进而进行元素积累相关性分析及积累评价。结果显示:背角无齿蚌中必需元素Se和Mo含量显著高于背瘤丽蚌,而Na、K和Cr含量显著低于背瘤丽蚌( $P<0.05$ );背角无齿蚌中非必需/有毒元素Al、As、Sr、Cd含量显著高于背瘤丽蚌( $P<0.05$ )。背角无齿蚌和背瘤丽蚌中分别有37对和34对元素之间显著相关,其中,Mg–Mo、Ca–Mn、Ca–Zn、Mn–Zn、Ca–Sr和Mo–Sr在两种蚌中均呈显著正相关( $P<0.05$ ),而Mg–Al和Fe–Tl均呈显著负相关( $P<0.05$ )。背角无齿蚌和背瘤丽蚌的元素积累指数(EAI)分别为3.7和3.2;两种蚌中无机As、Cd和Pb的残留量指数(RI)为0.2~39.1,背角无齿蚌中Cd的RI显著高于背瘤丽蚌( $P<0.05$ )。研究表明背角无齿蚌的元素积累能力总体强于背瘤丽蚌,它们的资源量受到Cd、Pb、As、Al和Tl等元素影响。

**关键词:**背角无齿蚌;背瘤丽蚌;生物多样性保护;元素积累

中图分类号:S917.4 文献标志码:A 文章编号:1672–2043(2023)10–2190–08 doi:10.11654/jaes.2023–0397

## Bioaccumulation characteristics of 20 elements between *Anodonta woodiana* and *Lamprotula leai*

CHEN Xiubao, JIANG Tao, LIU Hongbo, YANG Jian\*

(Laboratory of Fishery Microchemistry, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China)

**Abstract:** To effectively protect Chinese freshwater mussels, essential elements including the major elements Na, Mg, K, and Ca and trace elements of Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Se, and Mo, and non-essential / toxic elements, that is, Al, As, Sr, Cd, Ba, Tl, Pb, were investigated in *Anodonta woodiana* and *Lamprotula leai*. *A. woodiana* is endemic to China. *L. leai* has been newly listed as Class II priority wildlife. Both mussel resources have been sharply reduced. Element accumulation correlation analysis and accumulation evaluation were performed. The results have shown that concentrations of essential elements Se and Mo were significantly higher in *A. woodiana* than those of *L. leai*. Meanwhile, concentrations of Na, K, and Cr were significantly lower than those of *L. leai* ( $P<0.05$ ). Concentrations of non-essential / toxic elements Al, As, Sr, and Cd were significantly higher in *A. woodiana* than that in *L. leai* ( $P<0.05$ ). There were significant correlations between 37 and 34 pairs of elements in *A. woodiana* and *L. leai*, respectively. Among them, Mg–Mo, Ca–Mn, Ca–Zn, Mn–Zn, Ca–Sr and Mo–Sr showed significant positive correlations in both mussels ( $P<0.05$ ). Meanwhile, Mg–Al and Fe–Tl showed significant negative correlations ( $P<0.05$ ). The element accumulation indices (EAI) in *A. woodiana* and *L. leai* were 3.7 and 3.2, respectively. The residual indices (RI) of inorganic As, Cd, and Pb for both mussels ranged from 0.2 to 39.1. The RI of Cd was significantly higher in *A. woodiana* than that of *L. leai* ( $P<0.05$ ). These findings suggest that the element accumulation capacity of *A. woodiana* is generally stronger than that of *L. leai*, and their resources are affected by elements such as Cd, Pb, As, Al, and Tl.

**Keywords:** *Anodonta woodiana*; *Lamprotula leai*; biodiversity conservation; element bioaccumulation

收稿日期:2023–05–19 录用日期:2023–07–28

作者简介:陈修报(1983—),男,江苏新沂人,博士,副研究员,主要从事渔业生态环境评价与保护研究。E-mail:chenxb@ffrc.cn

\*通信作者:杨健 E-mail:jiany@ffrc.cn

基金项目:广东省渔业生态环境重点实验室开放基金项目(FEEL–2019–7)

Project supported: The Fund of Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment (FEEL–2019–7)

淡水贝类是淡水生态系统生物多样性的重要组成部分,在淡水生态系统的物质循环和能量流动过程中发挥着重要作用,被誉为“生态系统工程师”<sup>[1-2]</sup>。此外,淡水贝类因具有活动范围狭小、对污染物的高积累性和低代谢性、积累的污染物含量与水环境中污染物含量正相关等特点,被证实为评价水环境污染状况的理想指示生物<sup>[3]</sup>。需要高度重视的是,由于受到水环境污染等因素的影响,全球淡水贝类资源量锐减<sup>[4-5]</sup>。从我国鄱阳湖里的特有物种背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)和国家重点保护的背瘤丽蚌(*Lamprotula leai*)来看,其资源量在过去的26年间(1981—2007年)分别下降了70%和40%<sup>[6]</sup>。背瘤丽蚌更是在2021年被列入国家二级重点保护野生动物。

元素根据生物功能可分为必需元素(包括常量元素和微量元素)和非必需/有毒元素<sup>[7-8]</sup>。从元素计量学的角度来看,生命体的物质基础是元素<sup>[7]</sup>。不同物种的必需元素构成的稳态具有特异性<sup>[7]</sup>,如背角无齿蚌软组织中Mn、Fe、Cu和Zn含量分别是斑马贻贝(*Dreissena polymorpha*)的71、3、7倍和6倍<sup>[9]</sup>。然而,非必需/有毒元素的积累可打破必需元素所构成的稳态,如Cd积累易破坏Ca稳态并扰乱其生物功能<sup>[10]</sup>,从而影响生物的生长发育甚至导致死亡<sup>[3,10]</sup>。由此可见,淡水贝类的元素积累特征关乎其种群资源量变化。前人对于淡水贝类的元素计量学研究主要聚焦于非必需/有毒元素<sup>[2-3]</sup>,鲜有同步分析必需元素和非必需/有毒元素及其两者之间的耦合效应。

鉴于此,本研究拟探索资源量锐减的背角无齿蚌和国家重点保护的背瘤丽蚌对必需元素(常量元素Na、Mg、K、Ca;微量元素Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Se、Mo)和非必需/有毒元素(Al、As、Sr、Cd、Ba、Tl、Pb)的积累量和积累相关性,进而进行元素积累评价,以期为我国淡水贝类的元素计量学及其对资源量影响提供必要参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 样本采集与处理

鉴于鄱阳湖中背角无齿蚌和背瘤丽蚌资源量锐减<sup>[5-6]</sup>,难以采到大量样本,本研究于2019年10月在鄱阳湖都昌县周溪镇水域(29°06.8143'N, 116°18.8464'E)采集规格一致的背角无齿蚌[壳长为(6.5±0.9)cm]和背瘤丽蚌[壳长为(6.9±0.4)cm]各5个。两种蚌均营底栖生活,活动范围狭小。从贝壳年轮来鉴定,两者均为2龄幼蚌。每种蚌各采集5个样本,既可

以满足元素分析结果可靠性对样本量的需求<sup>[11]</sup>,又尽可能地减少对其资源量的影响。

用不锈钢解剖刀分离出蚌软组织,然后用超纯Milli-Q水(电阻率为18.2 MΩ·cm,美国Millipore公司)清洗样本6遍,依次用电子天平(ME104E型,瑞士Mettler Toledo公司)称质量后放入80℃烘箱中干燥24 h至质量恒定。根据软组织的湿质量和干质量之比,得出背角无齿蚌和背瘤丽蚌软组织的含水率分别为(78.3±13.2)%和(78.3±8.1)%。之后,用玛瑙研钵将干燥的样本磨成一粉末状。

### 1.2 元素测定

根据本实验室建立的元素分析方法<sup>[12]</sup>,同步测定背角无齿蚌和背瘤丽蚌软组织中必需元素(常量元素Na、Mg、K、Ca;微量元素Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Se、Mo)和非必需/有毒元素(Al、As、Sr、Cd、Ba、Tl、Pb)含量。简言之,精确称量经80℃烘干24 h并研磨均一化的粉末样本(0.1±0.005)g放入酸洗过的特氟隆消解管中,加入5 mL浓HNO<sub>3</sub>(65%,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(120℃,10 min; 170℃,15 min;再次170℃,15 min),最后转移至酸洗过的特氟隆定容瓶并用Milli-Q水定容至100 mL。应用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS; 7500ce型,美国Agilent公司)同步分析这20种元素。通过环境标准溶液(产品号:5183-4682,美国Agilent公司)的添加及回收确认ICP-MS的测量精度,所有元素的回收率为98%~110%。此外,应用标样(NRC DOLT-5鲨鱼肝微量元素标准物质,加拿大)对元素进行准确性质控,元素的回收率为90%~110%。20种元素的检测限见表1。

表1 元素检测限

Table 1 Detection limits of elements

元素 Element	检测限 Detection limit/(μg·L <sup>-1</sup> )	元素 Element	检测限 Detection limit/(μg·L <sup>-1</sup> )
Na	3.705	Cu	0.038
Mg	0.621	Zn	0.093
Al	0.109	As	0.033
K	1.775	Se	1.125
Ca	7.743	Sr	0.030
Cr	0.056	Mo	0.018
Mn	0.081	Cd	0.008
Fe	1.599	Ba	0.019
Co	0.005	Tl	0.003
Ni	0.053	Pb	0.010

### 1.3 元素积累指数和残留量指数的计算方法

为了总体评价背角无齿蚌和背瘤丽蚌的元素(包括必需元素和非必需/有毒元素)积累状况,通过计算两种蚌的元素积累指数(element accumulation index, EAI)进行比较分析<sup>[13]</sup>:

$$EAI = \frac{\sum_{j=1}^N I_j}{N}$$

$$I_j = x/\delta_x$$

式中:N表示测定的元素种类,I<sub>j</sub>指元素j的平均含量(x)与其标准差( $\delta_x$ )的比值。

此外,针对非必需/有毒元素,应用残留量指数(Residual index, RI)评价其污染水平<sup>[14]</sup>:

$$RI = C_i/C_{si}$$

式中,C<sub>i</sub>指蚌中非必需/有毒元素i的含量测定值,C<sub>si</sub>为非必需/有毒元素i的限量。其中,无机As、Cd和Pb的限量参考《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022)分别为0.5、2.0  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和1.5  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 湿质量。背角无齿蚌软组织中无机As含量占As的1.3%<sup>[15]</sup>;由于尚无背瘤丽蚌软组织中无机As含量的报道,因此参考我国常见淡水贝类中无机As占总砷的平均含量为8.2%来计算<sup>[15]</sup>。鉴于目前我国水产品上还没有Al、Sr、Ba和Tl的限量标准,因此它们暂不计人。当RI≤1时,表明未受明显污染;RI>1时,表明存在污染,且RI值越大代表污染越严重<sup>[14]</sup>。

### 1.4 统计分析

所有数据都以平均值±标准差的形式来表示。除了特殊说明之外,元素含量均以干质量计。应用SPSS 22.0统计软件的One-way ANOVA分别检验背角无齿蚌和背瘤丽蚌中元素含量差异,进而用Mann-Whitney U检验比较两种蚌之间元素含量及残留量指数差异。应用R语言(4.0.2版本)进行背角无齿蚌和背瘤丽蚌中元素积累的Pearson相关性分析。P<0.05表示差异水平或相关性显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 元素含量

#### 2.1.1 必需元素含量

背角无齿蚌和背瘤丽蚌的常量元素(Na、Mg、K、Ca)含量见表2。背角无齿蚌中Na、Mg、K、Ca含量差异不显著(P>0.05)。背瘤丽蚌中Ca含量显著高于K(P<0.05),其余元素含量差异不显著(P>0.05)。背角无齿蚌和背瘤丽蚌相比较,两者Mg和Ca含量相当(P>0.05),而前者Na和K含量显著低于后者(P<0.05)。

表2 背角无齿蚌和背瘤丽蚌的常量元素含量( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )

Table 2 Concentrations of major elements in *Anodonta woodiana* and *Lamprotula leai* ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )

常量元素 Major elements	背角无齿蚌 <i>A. woodiana</i>	背瘤丽蚌 <i>L. leai</i>
Na <sup>*</sup>	12 306.5±7 213.5	36 930.5±11 320.0
Mg	27 727.4±14 760.3	33 135.0±3 587.0
K <sup>*</sup>	7 608.8±2 507.3	15 994.4±6 600.6
Ca	534 573.9±226 933.6	636 358.3±190 581.1

注:<sup>\*</sup>表示元素含量在两种蚌中差异显著(P<0.05)。下同。

Note:<sup>\*</sup> indicates significant differences in elemental concentrations between the two mussels. The same below.

背角无齿蚌和背瘤丽蚌的微量元素(Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Se、Mo)含量见表3。背角无齿蚌中Fe含量显著高于除Mn之外的所有微量元素(P<0.05),Zn含量显著高于Cu、Se、Ni、Co、Cr和Mo(P<0.05),Cu和Se含量分别显著高于Ni、Co、Cr和Mo(P<0.05)。背瘤丽蚌中Fe含量亦显著高于除Mn之外的所有微量元素(P<0.05),Zn含量显著高于Cr(P<0.05),Ni和Co含量均显著高于Mo(P<0.05)。背角无齿蚌和背瘤丽蚌中Mn、Fe、Co、Ni、Cu和Zn含量相当(P>0.05),前者Se和Mo含量显著高于后者(P<0.05),而Cr含量显著低于后者(P<0.05)。

表3 背角无齿蚌和背瘤丽蚌的微量元素含量( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )

Table 3 Concentrations of trace elements in *Anodonta woodiana* and *Lamprotula leai* ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )

微量元素 Trace elements	背角无齿蚌 <i>A. woodiana</i>	背瘤丽蚌 <i>L. leai</i>
Cr <sup>*</sup>	7.1±1.3	41.6±21.8
Mn	85 625.3±38 535.7	74 957.1±34 494.5
Fe	13 595.8±1 981.9	21 995.6±5 749.6
Co	7.9±1.5	7.1±1.6
Ni	13.0±3.2	10.0±1.6
Cu	192.7±44.4	193.3±93.7
Zn	2 223.9±481.8	1 770.5±607.8
Se <sup>*</sup>	168.2±17.4	50.9±25.8
Mo <sup>*</sup>	3.9±0.8	0.5±0.1

#### 2.1.2 非必需/有毒元素含量

背角无齿蚌和背瘤丽蚌中非必需/有毒元素(Al、As、Sr、Cd、Ba、Tl、Pb)的含量见表4。背角无齿蚌中Ba、Al、Sr含量显著高于Tl(P<0.05),Cd、Pb、As含量差异不显著(P>0.05)。背瘤丽蚌中Ba、Al、Pb、Sr含量高于其他元素(P<0.05)。背角无齿蚌中Al、As、Sr和Cd含量均显著高于背瘤丽蚌(P<0.05)。

表4 背角无齿蚌和背瘤丽蚌中非必需/有毒元素的含量( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )  
Table 4 Concentrations of non-essential/toxic elements in  
*Anodonta woodiana* and *Lamprotula leai* ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )

必需/有毒元素 Non-essential/ toxic elements	背角无齿蚌 <i>A. woodiana</i>	背瘤丽蚌 <i>L. leai</i>
Al*	5 307.1±3 211.0	297.2±90.9
As*	37.6±11.5	10.6±3.9
Sr*	630.5±241.7	151.4±58.2
Cd*	126.2±56.9	39.3±16.7
Ba	104 049.7±33 289.6	212 518.0±101 556.8
Tl	1.4±0.7	2.2±0.9
Pb	102.7±32.4	270.0±170.6

## 2.2 元素相关性

背角无齿蚌和背瘤丽蚌中分别有37对(图1)和34对(图2)元素之间显著相关。其中,必需元素Mg-Mo、Ca-Mn、Ca-Zn和Mn-Zn在两种蚌中均呈显著正相关( $P<0.05$ ),此外,必需元素Ca、Mo和非必需元素Sr(Ca-Sr、Mo-Sr)之间也呈显著正相关( $P<0.05$ )。而必需元素Mg和非必需元素Al(Mg-Al)以及必需元素Fe和非必需元素Tl(Fe-Tl)在两种蚌中均呈显著负相关( $P<0.05$ )。其余元素相关性在两种蚌中表现出种间特异性。

## 2.3 元素积累评价

背角无齿蚌和背瘤丽蚌的元素(包括必需元素和

非必需/有毒元素)平均含量与其标准差的比值(I)以及元素积累指数(EAI)见图3。背角无齿蚌和背瘤丽蚌的EAI分别为3.7和3.2,前者是后者的1.2倍(图3)。在此基础上,进一步分析两种蚌中非必需/有毒元素无机As、Cd和Pb的残留量指数(RI)。由表5可见,背角无齿蚌和背瘤丽蚌中Cd和Pb的RI均大于1。其中,无机As和Pb的RI在两种蚌之间差异不显著( $P>0.05$ ),而前者Cd的RI显著高于后者( $P<0.05$ )。

## 3 讨论

### 3.1 背角无齿蚌和背瘤丽蚌的元素积累特征

鄱阳湖中背角无齿蚌和背瘤丽蚌的资源量锐减<sup>[5-6]</sup>,处于亟需保护的受威胁状态<sup>[5-6]</sup>。正因如此,背瘤丽蚌被新列为国家二级重点保护野生动物。虽然本研究分析的背角无齿蚌和背瘤丽蚌仅采集一次且

表5 背角无齿蚌和背瘤丽蚌中非必需/有毒元素残留量指数

Table 5 Residue indexes of non-essential/toxic elements for  
*Anodonta woodiana* and *Lamprotula leai*

贝类 Mussels	无机 As Inorganic As	Cd	Pb
背角无齿蚌 <i>A. woodiana</i>	0.2±0.1a	13.7±6.2a	14.9±4.7a
背瘤丽蚌 <i>L. leai</i>	0.4±0.1a	4.3±1.8b	39.1±24.7a

注:相同元素标注不同字母表示差异水平显著( $P<0.05$ )。

Note: Different letters for the same element indicate significant difference( $P<0.05$ ).

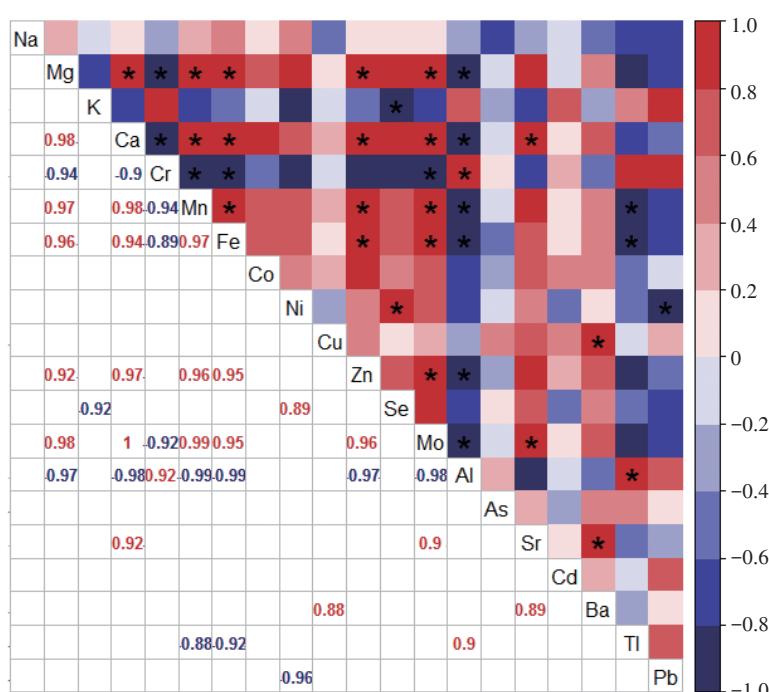


图1 背角无齿蚌元素含量的相关性

Figure 1 Correlations between element concentrations in *Anodonta woodiana*

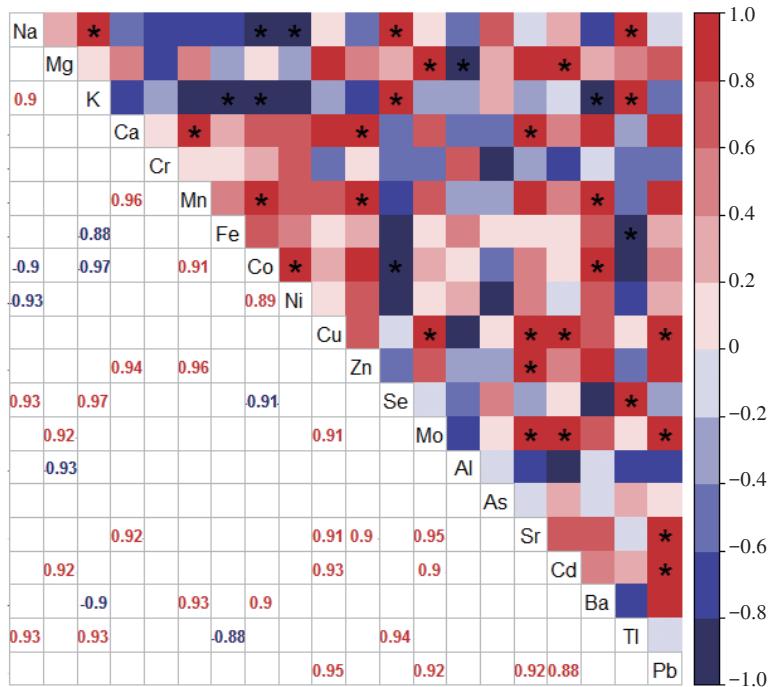


图2 背瘤丽蚌元素含量的相关性

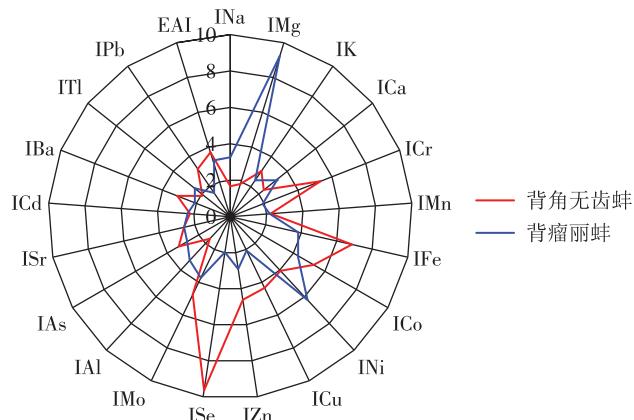
Figure 2 Correlations between element concentrations in *Lamprotula leai*

图3 背角无齿蚌和背瘤丽蚌的元素平均含量与其标准差的比值(1)以及元素积累指数(EAI)

Figure 3 Ratio of the mean element concentrations to its standard deviation (1) and element accumulation indexes (EAIs) of *Anodonta woodiana* and *Lamprotula leai*

各有5个,但是这已是当时调查时所能采到的全部样本。尽管如此,贝类监测因具有活动范围狭小、对非必需/有毒元素高积累而低代谢且积累量与水环境含量正相关等特征,基于一次采集的小样本量(每个位点最低可至3个样本)已能有效反映出贝类及水环境的元素积累状况<sup>[11,16-17]</sup>。例如,陈修报等<sup>[16]</sup>通过分析采自太湖梅梁湾和云南茈碧湖的各5个背角无齿蚌,

有效反映出两个水域的元素背景;Varol等<sup>[17]</sup>通过在每个监测位点采集3~8个珠蚌 *Unio elongatulus eucirrus* 进行元素分析,有效反映出土耳其凯班大坝水库(Keban Dam Reservoir)元素积累时空动态。

淡水贝类通过易化扩散、主动运输和细胞内吞作用吸收水环境中必需元素和非必需/有毒元素<sup>[3]</sup>。贝类对元素的积累受到外因(如水环境条件)和内因(如贝类规格、元素积累性能)共同影响<sup>[18]</sup>。在元素含量高的水环境中,贝类软组织的元素积累量相应增加<sup>[16]</sup>。而由于“生长稀释”效应,在幼蚌阶段可能出现生长迅速的贝类的元素含量低于小规格个体的情况<sup>[19-20]</sup>。本研究中背角无齿蚌和背瘤丽蚌来自鄱阳湖都昌县周溪镇的相同水环境,且两者规格一致,因此,两种蚌的元素积累差异应归结为它们对元素积累性能之间的差别。

必需元素具有构成组织成分、作为酶的辅基或酶的激活剂、作为体液中的电解质以维持渗透压及酸碱平衡并保持细胞形态、维持神经和肌肉的正常敏感性等重要生理功能<sup>[21]</sup>。在常量元素中,背瘤丽蚌Ca含量显著高于K,这不同于背角无齿蚌的Ca和K含量相一致。Ca对淡水贝类至关重要,不仅是肌肉系统的关键组成成分<sup>[21]</sup>,软组织中积累的Ca还是贝壳形成的Ca源<sup>[22]</sup>。背瘤丽蚌属于“厚壳型”贝类,而背角无

齿蚌属于“薄壳型”贝类,相似规格的背瘤丽蚌贝壳质量是背角无齿蚌的4倍<sup>[23-24]</sup>,因此,背瘤丽蚌软组织对Ca的需求量要大于背角无齿蚌。尽管如此,背瘤丽蚌软组织中K和Na含量仍显著高于背角无齿蚌。K和Na分别是细胞内、外最主要的阳离子<sup>[21]</sup>,可通过Na-K泵在调解渗透压平衡过程中发生重要作用<sup>[25]</sup>,提示背瘤丽蚌对体液中电解质浓度的需求量要高于背角无齿蚌。

在微量元素中,背角无齿蚌和背瘤丽蚌的共性特征是总体上Mn和Fe含量最高,Zn和Cu含量次之,而Mo含量最低。在淡水贝类中,Mn含量高是较为普遍的现象<sup>[26]</sup>,甚至超过常量元素Na和K<sup>[22]</sup>,提示Mn对淡水贝类具有特殊意义。Mn是丙酮酸羧基化酶、超氧化物气化酶等酶类的激活剂<sup>[21]</sup>。此外,Mn在淡水珠蚌*Unio pictorum mancus*中还起到抗氧化作用,其Mn含量与抗氧化能力呈正相关的趋势<sup>[26]</sup>。由于背角无齿蚌和背瘤丽蚌软组织中Mn含量远高于作为酶辅基或酶激活剂的需求量,因此,这两者积累的Mn可能发挥抗氧化作用。Fe是构成血红蛋白的组分,且是过氧化物酶、过氧化氢酶、羟基酶和黄酮酶的激活剂<sup>[20]</sup>。然而,淡水贝类是以血蓝蛋白(含Cu呼吸蛋白)为氧气运输载体。因此,Fe在背角无齿蚌和背瘤丽蚌中可能更多发挥酶的辅基或酶的激活剂作用。Cu对生物功能具有“双刃剑”作用。Cu含量较低时,促进淡水贝类的生长发育,而其积累量较高时,则诱导机体产生过量的活性氧引发氧化损伤<sup>[27]</sup>。刘凯等<sup>[28-29]</sup>研究发现背角无齿蚌软组织中Cu积累量达到100 μg·g<sup>-1</sup>,便可造成背角无齿蚌外套膜出现细胞坏死以及斧足黏液细胞变形和上皮层损伤。本研究中背角无齿蚌和背瘤丽蚌软组织中Cu平均积累量分别高达192.7 μg·g<sup>-1</sup>和193.3 μg·g<sup>-1</sup>。与Cu类似,背角无齿蚌和背瘤丽蚌对Zn也表现出高积累,这可能是由于Cu和Zn是鄱阳湖流域沉积物中主要累积的元素<sup>[30]</sup>,淡水贝类营底栖生活会从沉积物中吸收大量Cu和Zn<sup>[31]</sup>。如此高的Cu和Zn积累量对背角无齿蚌和背瘤丽蚌的组织损伤及种群资源量的影响有待于进一步的研究。Mo是构成醛氧化酶和黄嘌呤氧化酶的组分<sup>[21]</sup>。Mo在背角无齿蚌和背瘤丽蚌中含量总体较低,这与前人研究结果相吻合<sup>[32]</sup>。尽管如此,背角无齿蚌中Mo含量仍达到背瘤丽蚌的7倍,提示背角无齿蚌对Mo可能具有更高的生理需求。Se是抗氧化剂,构成抗氧化酶谷胱甘肽过氧化物酶的组分<sup>[21]</sup>。背角无齿蚌中Se含量显著高于背瘤丽蚌,表明背角无齿蚌具有更强的

抗氧化性能,Bielen等<sup>[33]</sup>研究也证实了背角无齿蚌具有更强的抗逆性。Cr在葡萄糖的利用过程中发挥重要作用<sup>[21]</sup>。然而,过量的Cr积累也会对淡水贝类产生毒性效应。张琦等<sup>[34]</sup>发现Cr是影响湘江流域无齿蚌和背瘤丽蚌等贝类群落结构的关键因素之一。本研究中背瘤丽蚌软组织中Cr含量较背角无齿蚌高6倍,平均达到416.4 μg·g<sup>-1</sup>,其对鄱阳湖中背瘤丽蚌资源的影响有待于进一步考证。

不同于必需元素的积累易受到生理调控影响,贝类对非必需/有毒元素的积累往往与其在水环境中的含量呈正相关<sup>[3]</sup>。背角无齿蚌中Al、As、Sr和Cd含量显著高于背瘤丽蚌,其余非必需/有毒元素在两者中含量相当,表明背角无齿蚌对这些非必需/有毒元素具有更高积累性。这与残留量指数(RI)分析结果相一致。此外,两种蚌的RI显示其生存的鄱阳湖都昌县周溪镇水域可能受到Cd和Pb污染。刘佳伟等<sup>[30]</sup>研究也显示鄱阳湖流域由于受到人为工农业活动影响导致重金属污染,其沉积物中Cd达到中等危害水平,Pb和As处于轻微危害水平。水环境的非必需/有毒元素污染或在贝类体内过量积累可影响贝类的生长甚至存活<sup>[3]</sup>。下一步有必要对鄱阳湖非必需/有毒元素污染状况进行全面监测,并分析湖中背角无齿蚌和背瘤丽蚌的资源动态与水环境Cd、Pb和无机As含量之间的关联性。

当水生动物中Cr、Cd或Pb积累量高于100 μg·g<sup>-1</sup>,Ni、Cu、Se、Al或As积累量高于1 000 μg·g<sup>-1</sup>,Mn或Zn积累量高于10 000 μg·g<sup>-1</sup>,被认为是对它们具有超积累性<sup>[35]</sup>。由此可见,本研究中的背角无齿蚌对必需元素Mn和非必需/有毒元素Al、Cd、Pb具有超积累性,而背瘤丽蚌对必需元素Mn和非必需/有毒元素Pb具有超积累性。尽管如此,元素积累指数(EAI)结果显示背角无齿蚌总体较背瘤丽蚌对元素具有更高的积累能力。这可能是由于前者对元素具有更高的吸收率和(或)更低的排放率所致。前人研究也显示,背角无齿蚌的元素积累能力总体高于其他淡水贝类,如斑马贻贝<sup>[3]</sup>、褶纹冠蚌(*Cristaria plicata*)<sup>[36]</sup>、圆顶珠蚌(*Unio douglasiae*)<sup>[36]</sup>和三角帆蚌(*Hyriopsis cumingii*)<sup>[37]</sup>等。正因如此,背角无齿蚌被确定为“淡水贝类观察”研究体系的专用指示生物<sup>[2]</sup>。

### 3.2 背角无齿蚌和背瘤丽蚌的元素积累相关性

本研究中背角无齿蚌和背瘤丽蚌生存于相同的水环境,可是它们分别有37对和34对元素之间显著相关,而在两者中共同相关的元素仅有8对,表明淡

水贝类的元素积累相关性具有明显的种间特异性。这可能是由于不同物种的元素积累动力学(包括对元素的吸收率、同化率、排出率等)差异造成的<sup>[38]</sup>。需要指出的是,目前关于淡水贝类的元素积累动力学研究尚处于起步阶段<sup>[2]</sup>,急需加强该领域的深入研究。

具有相似理化性质(如原子大小、离子价态)的元素,若在积累过程中表现为协同关系,则元素之间呈正相关<sup>[39~40]</sup>;相反,若表现为拮抗关系,则元素之间呈负相关<sup>[39~40]</sup>。其中,必需元素之间的正相关积累,对淡水贝类往往发挥有益作用。例如,在背角无齿蚌和背瘤丽蚌中Mg-Mo、Ca-Mn、Ca-Zn、Mn-Zn、Ca-Sr和Mo-Sr之间均显著正相关,这将有利于它们的生长、发育及存活。与之相比,更需重点关注非必需/有毒元素对必需元素负相关积累的危害作用。例如,Al在背角无齿蚌中与Mg、Ca、Mn、Fe、Zn和Mo含量显著负相关,在背瘤丽蚌中亦与Mg含量显著负相关,这势必会造成两种蚌的Al过度积累,引发Mg、Ca、Mn、Fe、Zn和Mo的流失,从而破坏电解质/渗透压平衡、导致新陈代谢失调并产生基因毒性<sup>[41]</sup>。因此,在背角无齿蚌和背瘤丽蚌等淡水贝类资源保护过程中,还需重视非必需元素(如Al、Tl、Ba)积累对必需元素的负相关作用影响。

## 4 结论

(1)背角无齿蚌对Mn、Al、Cd和Pb具有超积累性,而背瘤丽蚌对Mn和Pb具有超积累性。两者相比较,背角无齿蚌的元素积累能力总体高于背瘤丽蚌。

(2)背角无齿蚌和背瘤丽蚌的元素积累相关关系具有种间特异性。其中,非必需/有毒元素(如Al、Tl、Ba)对必需元素的负相关作用需引起重视。

(3)背角无齿蚌和背瘤丽蚌的残留量指数揭示鄱阳湖都昌县周溪镇水域受到Cd和Pb污染。这些元素对淡水贝类资源量的影响有待于进一步研究。

## 参考文献:

- [1] VAUGHN C C. Ecosystem services provided by freshwater mussels[J]. *Hydrobiologia*, 2018, 810: 15~27.
- [2] 陈修报, 杨健, 刘洪波, 等. 淡水贝类观察:生物阐释水污染和毒理的创新手段[J]. 湖泊科学, 2021, 33(1): 11~27. CHEN X B, YANG J, LIU H B, et al. "Freshwater mussel watch": an innovative approach for interpretations of aquatic pollution and toxicology[J]. *Journal of Lake Science*, 2021, 33(1): 11~27.
- [3] FARRIS J L, HASSEL J H V. Freshwater bivalve ecotoxicology[M]. CRC Press, Boca Raton, Florida, and SETAC Press, Pensacola, Florida, 2007: 19~49.
- [4] LOPES-LIMA M, BURLAKOVA L E, KARATAYEV A Y, et al. Conservation of freshwater bivalves at the global scale: diversity, threats and research needs[J]. *Hydrobiologia*, 2018, 810: 1~14.
- [5] LIU X, LIU Y, WU R, et al. Systematics, distribution, biology, and conservation of freshwater mussels (Bivalvia:Unionida) in China[J]. *Aquatic Conservation-Marine and Freshwater Ecosystems*, 2022, 32: 859~895.
- [6] 刘勇江. 鄱阳湖淡水双壳类的资源状况及优势种繁殖特征[D]. 南昌:南昌大学, 2007: 40~47. LIU Y J. Resource status and reproductive traits of freshwater bivalves in the Poyang Lake[D]. Nanchang: Nanchang University, 2007: 40~47.
- [7] STERNER R W, ELSER J J. Ecological stoichiometry : the biology of elements from molecules to the biosphere[M]. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 2002: 44~79.
- [8] PINTO E, ALMEIDA A, FERREIRA I M P L V O. Essential and non-essential/toxic elements in rice available in the Portuguese and Spanish markets[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2016, 48: 81~87.
- [9] 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.
- [10] GENCHI G, SINICROPI M S, LAURIA G, et al. The effects of cadmium toxicity[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(11): 3782.
- [11] 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[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72: 365~371.
- [12] 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.
- [13] ELSHAMY M M, HEIKAL Y M, BONANOMI G. Phytoremediation efficiency of *Portulaca oleracea* L. naturally growing in some industrial sites, Dakahlia District, Egypt[J]. *Chemosphere*, 2019, 225: 678~687.
- [14] 杨婉玲, 赖子尼, 魏泰莉, 等. 北江清远段水产品中铅含量调查[J]. 淡水渔业, 2007, 37(3): 67~69. YANG W L, LAI Z N, WEI T L, et al. The content of lead in the aquatic products in Qingyuan Basin of Beijiang River[J]. *Freshwater Fisheries*, 2007, 37(3): 67~69.
- [15] YANG F, ZHANG N, WEI C, et al. Arsenic speciation in organisms from two large shallow freshwater lakes in China[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2017, 98: 226~233.
- [16] 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. CHEN X B, SU Y P, SUN L, et al. Bioaccumulation characteristics of heavy metals in bivalve *Anodonta woodiana* from different habitats with different pollution backgrounds[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 1060~1067.
- [17] VAROL M, SÜNBÜL M R. Biomonitoring of trace metals in the Kebaran Dam Reservoir (Turkey) using mussels (*Unio elongatulus eucir-*

- rus) and crayfish (*Astacus leptodactylus*) [J]. *Biological Trace Element Research*, 2018, 185(1): 216–224.
- [18] WANG W X, TAN Q G. Applications of dynamic models in predicting the bioaccumulation, transport and toxicity of trace metals in aquatic organisms[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 252: 1561–1573.
- [19] STROGYLOUDI E, KRASAKOPOULOU E, GIANNAKOUROU A, et al. How environmental factors determine mussel metal concentrations? A comparative study between areas facing different pressures [J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2023, 59: 102806.
- [20] OTCHERE F A. Heavy metals concentrations and burden in the bivalves (*Anadara (Senilia) senilis*, *Crassostrea tulipa* and *Perna perna*) from lagoons in Ghana: model to describe mechanism of accumulation/excretion[J]. *Frontiers of Agriculture and Food Technology*, 2020, 10(1): 1–8.
- [21] BELITZ H D, GROSCH W, SCHIEBERLE P. Food chemistry[M]. 4<sup>th</sup> revised and extended ed. Berlin Heidelberg: Springer, 2009: 421–428.
- [22] 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.
- [23] CHEN X B, SU Y P, LIU H B, et al. Mineral composition variation in the shells of freshwater mussel *Anodonta woodiana* at different growth stages[J]. *Invertebrate Reproduction and Development*, 2017, 61: 274–282.
- [24] 张根芳, 张文府, 方爱萍, 等. 养殖条件下不同年龄背瘤丽蚌(*Lamprotula leai*)数量性状的相关与通径分析[J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(5): 1115–1121. ZHANG G F, ZHANG W F, FANG A P, et al. Correlation and path analysis of quantitative traits of different-age *Lamprotula leai* in artificial breeding[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2014, 45(5): 1115–1121.
- [25] LE T T Y, NACHEV M, GRABNER D, et al. Modelling chronic toxicokinetics and toxicodynamics of copper in mussels considering ionoregulatory homeostasis and oxidative stress[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 287: 117645.
- [26] CAMPANELLA L, GATTA T, RAVERA O. Relationship between anti-oxidant capacity and manganese accumulation in the soft tissues of two freshwater molluscs: *Unio pictorum mancus* (Lamellibranchia, Unionidae) and *Viviparus ater* (Gastropoda, Prosobranchia) [J]. *Journal of Limnology*, 2005, 64(2): 153–158.
- [27] TAVARES-DIAS M. Toxic, physiological, histomorphological, growth performance and antiparasitic effects of copper sulphate in fish aquaculture[J]. *Aquaculture*, 2021, 535: 736350.
- [28] 刘凯, 陈修报, 刘洪波, 等. 背角无齿蚌幼蚌不同组织的铜积累特征[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(5): 943–949. LIU K, CHEN X B, LIU H B, et al. Copper accumulation patterns in different tissues of juvenile *Anodonta woodiana* individuals[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(5): 943–949.
- [29] 刘凯, 陈修报, 刘洪波, 等. 铜对背角无齿蚌幼蚌的组织损伤效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1183–1189. LIU K,
- CHEN X B, LIU H B, et al. Effects of copper on tissues of juvenile *Anodonta woodiana* [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(6): 1183–1189.
- [30] 刘佳伟, 杨明生. 鄱阳湖流域重金属污染评价与分析[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(1): 99–103. LIU J W, YANG M S. Assessment and analysis of heavy metal pollution in Poyang Lake Basin[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2022, 44(1): 99–103.
- [31] XU X, PAN B, SHU F, et al. Bioaccumulation of 35 metal (loid)s in organs of a freshwater mussel (*Hyriopsis cumingii*) and environmental implications in Poyang Lake, China[J]. *Chemosphere*, 2022, 307: 136150.
- [32] LIU H B, YANG J, GAN J L. Trace element accumulation in bivalves *Anodonta woodiana* from the Taihu Lake, China[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2010, 59(4): 593–601.
- [33] BIELEN A, BOŠNJAK I, SEPČIĆ K, et al. Differences in tolerance to anthropogenic stress between invasive and native bivalves[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 543: 449–459.
- [34] 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[J]. 水生态学杂志, 2018, 39(2): 48–57. ZHANG Q, WANG F M, LUO Y P, et al. Macroinvertebrate community structure and relationship with the Xiangjiang River environment[J]. *Journal of Hydroecology*, 2018, 39(2): 48–57.
- [35] GIFFORD S, DUNSTAN R H, O'CONNOR W, et al. Aquatic zooremediation: deploying animals to remediate contaminated aquatic environments[J]. *TRENDS in Biotechnology*, 2006, 25(2): 60–65.
- [36] 周晏敏, 强建华, 王庆忠, 等. 嫩江-齐齐哈尔江段几种蚌类重金属残毒水平[J]. 干旱环境监测, 1995, 9(1): 44–47. ZHOU Y M, QIANG J H, WANG Q Z, et al. Heavy metal residue levels of several mussels in Nenjiang-Qiqihar river[J]. *Arid Environmental Monitoring*, 1995, 9(1): 44–47.
- [37] 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 T X, LIU X H, ZHAO M B. 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.
- [38] LUOMA S N, RAINBOW P S. Why is metal bioaccumulation so variable? Biodynamics as a unifying concept[J]. *Environment Science & Technology*, 2005, 39: 1921–1931.
- [39] PEROŠEVIĆ A, PEZO L, JOKSIMOVIĆ D, et al. The impacts of seawater physicochemical parameters and sediment metal contents on trace metal concentrations in mussels: a chemometric approach[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25: 28248–28263.
- [40] 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.
- [41] IGBOKWE I O, IGWENAGU E, IGBOKWE N A. Aluminium toxicosis: a review of toxic actions and effects[J]. *Interdisciplinary Toxicology*, 2019, 12: 45–70.

(责任编辑:叶飞)