

背角无齿蚌组织中的元素分布研究

李 威^{1,2}, 杨 健¹, 陈修报^{1,2}, 赵 颖^{1,2}, 苏彦平¹, 刘洪波¹

(1.中国水产科学研究院内陆渔业环境与资源重点开放实验室, 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 江苏 无锡 214081;
2.南京农业大学无锡渔业学院, 江苏 无锡 214081)

摘 要: 利用 Agilent 7500ce 型电感耦合等离子质谱仪研究了 18 种元素(Na、Mg、K、Ca、Zn、Mn、Fe、Al、Cu、Cr、Co、Ni、As、Se、Mo、Ag、Tl、Pb)在背角无齿蚌 5 种组织(外套膜、闭壳肌、足、鳃和内脏团)中的分布特征。结果表明,总体上鳃中元素的浓度最高,内脏团和外套膜次之,足和闭壳肌中较低。Ca、Mn、Mg、Zn、Al、Cu、Ni、As 和 Se 9 种元素浓度均在鳃中最高,Na 在外套膜中浓度最高,K 在足中浓度最高,Fe 和 Pb 在内脏团中浓度最高。元素负荷量的绝大部分存在于重量较大的鳃和内脏团中,但近 50%的 Na 却积累于外套膜、闭壳肌和足中。背角无齿蚌不同组织或器官对元素的积累具有明显的选择性。

关键词: 背角无齿蚌;元素;组织;浓度;负荷量

中图分类号: X835 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2010)03-0597-07

The Distribution of Elements in the Tissues of Mussel *Anodonta woodiana*

LI Wei^{1,2}, YANG Jian¹, CHEN Xiu-bao^{1,2}, ZHAO Ying^{1,2}, SU Yan-ping¹, LIU Hong-bo¹

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

Abstract: The bioaccumulation of 18 elements (Na, Mg, K, Ca, Zn, Mn, Fe, Al, Cu, Cr, Co, Ni, As, Se, Mo, Ag, Tl, and Pb) were evaluated in the five tissues (mantle, adductor muscle, foot, gill, and visceral mass) of *Anodonta woodiana* using an Agilent 7500ce inductively coupled plasma mass spectroscopy (ICP-MS). A tissular selective accumulation of certain elements was found in *Anodonta woodiana* of both concentration and burden results in the present study. The greatest concentration of most elements was found in the gills, followed by the visceral mass and mantles, while those in the foot and adductor muscles were relatively low. The highest levels of Ca, Mn, Mg, Zn, Al, Cu, Ni, As, and Se were in the gills; those of Fe and Pb were in the visceral mass, that of Na was in the mantle, and that of K was in the foot, respectively. The gill and visceral mass generally accounted for the largest percentage of the whole soft body element burdens, whereas the mantle, foot and adductor muscle stored ca. 50% of the Na burden.

Keywords: *Anodonta woodiana*; element; tissue; concentration; burden

一些生物(如贝类)体内的环境化学物质和污染物的浓度能够反映较长一段时间内其生境中污染物的水平。因此,在评估环境中这些物质的生物利用度(bioavailability)时,测定有机体中的含量被认为是唯一有效的方法^[1]。大型底栖生物中的贝类具有分布广、

生活史长、行动能力差等特点,是水体污染指示生物的主要选择对象^[2]。它们能够在体内富集各种化学物质而对自身没有明显的危害,常被用来研究环境中持久性污染物的存在状况^[3]。

自 Goldberg 首先提出“贝类观察(Mussel Watch)”概念,并利用贝类有效地监测了美国东部和西部海岸重金属、DDE、PCB、芳烃、人工放射性核素类等污染以来,贝类观察计划得到了迅速发展,迄今已广泛应用于许多国家和地区的区域性海洋污染物监测计划中^[2,4-5],比如中国水产科学研究院南海水产研究所于 20 世纪 90 年代初论证和建立了具有我国特色的“南海贻贝观察”体系,于 1989—1997 年应用该技术体系

收稿日期:2009-07-17

基金项目:江苏省自然科学基金(BK2006030);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(6-115007);中国水产科学研究院内陆渔业生态环境和资源重点开放实验室开放基金课题(YZ2009-03)

作者简介:李 威(1986—),男,河南信阳人,从事渔业生态环境监测与保护研究。

通讯作者:杨 健 E-mail: jiany@ffrc.cn

对广东沿海各种污染物进行了连续监测和研究^[6]。上述“贝类观察”手段主要是通过测定并比较不同采样点的双壳贝类体内(多用全部软组织)污染物的积累水平来达到有效获知不同水域相应污染物的污染状况的目的。迄今,该手段的应用主要在海洋方面,淡水方面尚很少见且不系统。相似的研究有 Camusso 等^[7]通过测定意大利五个湖泊中斑马纹贻贝(*Dreissena polymorpha*)体中 Cd、Cr、Ni、Pb 和 Zn 元素的浓度水平,把这些湖泊划分为无污染、轻度污染、污染、重度污染等几个类别,有效地评估了这些湖泊的重金属元素的污染。

作为“贝类观察”的基础研究之一,元素在相关贝类体内的积累机制、各组织中的浓度的分布特征及其可能的生物学意义、各组织中的量占蚌总体元素负荷量的比率等同样引人注目。Ravera 等^[1]研究了 16 种元素在两种淡水珠蚌 *Unio pictorum murex* 和 *Anodonta cygnea* 不同组织(鳃、外套膜、内脏团和闭壳肌)中的分布情况,报道了珠蚌科贝类不同组织中元素的分布有不均衡的趋势。

背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)隶属于软体动物门、瓣鳃纲、珠蚌科。在我国分布很广,其贝壳大型,多栖息于水底,以浮游生物及有机碎屑为食^[8-9]。2003 年以来笔者研究室首次在淡水环境中进行了“贝类观察”研究较为系统的尝试,筛选和利用背角无齿蚌为指示生物,对太湖水域重金属^[8,10-11]、有机锡^[12]、有机氯^[13-14]污染进行了有效的评价。作为机理性研究,本研究测定了背角无齿蚌 5 种组织或器官中 18 种元素的含量,以期探索这些元素在背角无齿蚌体内分布的组织选择性、积累机制、负荷量特征,并探讨这些特征的生理或毒理学意义,同时为正在建立的淡水“贝类观察”体系提供新的基础资料。

1 材料与方法

1.1 样本的采集和预处理

实验所用 8 只规格相似的背角无齿蚌采集于中国水产科学研究院淡水渔业研究中心无锡南泉基地,先

测量其外部形态(表 1),再开壳分离出全部软组织,用 Milli-Q 水(电阻率:18.2 MΩ·CM)冲洗 6 遍,称全部软组织重量。解剖软组织以分离出外套膜、闭壳肌、足、鳃和内脏团,再称各组织或器官湿重并分别放入 80 ℃干燥箱中干燥至恒重(24 h),称量相应器官干重,并计算各组织或器官含水率(表 2)。

表 1 背角无齿蚌样本基本参数

Table 1 Biometry of *Anodonta woodiana* in the present study

样本号	壳长/mm	壳高/mm	壳宽/mm	带壳重/g	软组织重/g
2008-AWN25	136.64	90.51	50.93	121.35	54.86
2008-AWN26	139.94	98.25	51.66	101.44	63.22
2008-AWN27	136.82	82.86	54.44	331.50	58.31
2008-AWN28	127.29	82.95	49.10	213.59	34.51
2008-AWN29	132.66	78.20	51.04	259.47	54.68
2008-AWN30	128.34	78.85	52.90	292.63	45.01
2008-AWN31	125.25	83.72	48.21	277.12	41.19
2008-AWN33	118.60	78.19	47.16	239.23	38.03

1.2 样本的研磨和微波消解

用玛瑙研钵将干燥后的各组织或器官研磨使其均一化,各称取 0.1 g 干样装入消解管,每个消解管中加入 10 mL 浓硝酸(MOS 级,国药集团化学试剂有限公司,金属离子含量 ≤ 0.000 2%),利用意大利 Milestone ETHOS A T260 型微波消解仪进行消解。消解好的样本小心转移至定量瓶中,定量至 200 mL,称出重量,并算出稀释倍数。

1.3 样本元素浓度和负荷量的测定或计算

利用美国 Agilent 7500ce 型电感耦合等离子质谱仪测定各组织或器官以及回收样中 18 种元素(Na、Mg、K、Ca、Zn、Mn、Fe、Al、Cu、Cr、Co、Ni、As、Se、Mo、Ag、Tl、Pb)的浓度。每个样本均采用氦气+氩气或氩气模式测量得到各元素浓度数据,利用元素标准添加回收法确定上述元素的回收率均在 79%~116%之间。文中所有的浓度数据均为干重浓度。背角无齿蚌各组织或器官元素负荷量为各器官元素浓度和各器官重量的乘积,其总和即为全部软组织中元素的总负荷量。

表 2 背角无齿蚌各组织或器官干湿重及含水率

Table 2 Wet and dry weights of various tissues of *Anodonta woodiana* and their moisture contents

项目	外套膜	闭壳肌	足	鳃	内脏团	整个软组织
湿重/g	7.417±2.213	2.427±0.495	3.290±0.809	7.026±2.130	11.837±2.471	31.997
干重/g	0.622±0.223	0.327±0.071	0.429±0.158	1.033±0.311	1.718±0.607	4.129
含水率/%	91.4±2.3	86.5±1.4	87.2±2.0	85.0±3.2	85.7±2.4	87.2±2.5

注:表中数据为平均值±标准偏差。

2 结果

2.1 背角无齿蚌各组织或器官中元素的浓度

从表 3 可以看出, 各元素浓度组织间差别较大。鳃、外套膜和内脏团中元素浓度较高, 足和闭壳肌中相对较低。Ca、Mn、Mg、Zn、Al、Cu、Ni、As 和 Se 9 种元素浓度均在鳃中最高, Na 在外套膜中浓度最高, Fe 和 Pb 在内脏团中浓度最高, K 在足中浓度最高, 而 Cr、Co、Mo、Ag、Tl 在外套膜中的浓度极低, 在其他组织中则低于检测限。特别是: Ca 在鳃中的浓度超过了 $10^5 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 在外套膜和内脏团中的浓度则超过 $10^4 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; Mn 在鳃、外套膜和内脏团中的浓度也达到或接近 $10^4 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; 有毒元素 As 在鳃和内脏团中分别达到了 8 和 $6 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; 有毒元素 Pb 在内脏团中的浓度

则达到了 $3 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

背角无齿蚌软组织各器官元素的浓度顺序见表 4。从中可以看出, 各器官元素浓度大小顺序并不一致, 但均为 Ca、Mn、Na、K、Fe、Mg、Zn、Al 在各器官中浓度较高, Cu、As、Pb、Ni、Se、Cr、Co、Mo、Ag、Tl 在各器官中浓度较低。

2.2 背角无齿蚌各组织或器官中元素的负荷量

表 5 反映了背角无齿蚌软组织各器官中元素的平均负荷量。总体来说, 背角无齿蚌软组织各元素的总负荷量高低顺序为: $\text{Ca}>\text{Mn}>\text{Fe}>\text{K}>\text{Na}>\text{Mg}>\text{Zn}>\text{Al}>\text{Cu}>\text{As}>\text{Pb}>\text{Ni}>\text{Se}>\text{Co}>\text{Cr}>\text{Mo}>\text{Ag}>\text{Tl}$ 。从图 1 可以看出, 背角无齿蚌各组织对元素的选择性比较明显, 绝大多数元素主要集中在鳃和内脏团中, 外套膜次之, 闭壳肌和足中各元素含量较低。背角无齿蚌整个软组

表 3 背角无齿蚌各组织或器官元素平均浓度($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
Table 3 Mean element concentrations($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) of various tissues in the soft body of *Anodonta woodiana*

元素	外套膜	闭壳肌	足	鳃	内脏团
Ca	51 946±25 561	8 471±7 945	4 315±4 310	113 785±21 670	46 901±32 353
Mn	10 077±6 931	1 650±1 551	990±994	17 151±8 394	9 618±6 989
Na	3 202±1 538	1 050±609	1 280±774	1 251±537	1 087±587
Fe	1 533±763	231±247	582±893	2 009±762	4 732±2 806
K	1 349±504	1 229±498	2 282±970	1 218±363	1 628±700
Zn	1 022±378	223±121	213±85	1 683±480	811±414
Mg	975±571	369±66	404±54	1 732±623	735±293
Al	92±96	52±128	4±7	208±190	71±87
Cu	7.568±7.977	0.357±0.694	0.850±1.725	13.719±15.969	3.971±4.046
As	3.665±2.569	0.328±0.809	1.073±1.848	8.456±3.532	6.311±3.542
Pb	1.252±1.616	—	—	2.723±2.697	3.063±3.288
Ni	0.106±0.242	—	—	1.502±0.992	0.514±0.462
Se	0.081±0.160	0.043±0.102	0.088±0.248	0.692±1.103	0.358±0.984
Co	0.065±0.185	—	—	—	—
Cr	0.057±0.161	—	—	—	—
Mo	0.045±0.126	—	—	—	—
Ag	0.005±0.015	—	—	—	—
Tl	0.000±0.001	—	—	—	—

注:表中数据为平均值±标准偏差;“—”表示该器官元素浓度低于检测限。

表 4 背角无齿蚌各组织或器官元素的平均浓度递减顺序

Table 4 Decreasing order of the mean element concentrations of various tissues in the soft body of *Anodonta woodiana*

组织或器官	元素的浓度顺序
外套膜	$\text{Ca}>\text{Mn}>\text{Na}>\text{Fe}>\text{K}>\text{Zn}>\text{Mg}>\text{Al}>\text{Cu}>\text{As}>\text{Pb}>\text{Ni}>\text{Se}>\text{Co}>\text{Cr}>\text{Mo}>\text{Ag}>\text{Tl}$
闭壳肌	$\text{Ca}>\text{Mn}>\text{K}>\text{Na}>\text{Mg}>\text{Fe}>\text{Zn}>\text{Al}>\text{Cu}>\text{As}>\text{Se}>\text{Pb}, \text{Ni}, \text{Co}, \text{Cr}, \text{Mo}, \text{Ag}, \text{Tl}$
足	$\text{Ca}>\text{K}>\text{Na}>\text{Mn}>\text{Fe}>\text{Mg}>\text{Zn}>\text{Al}>\text{As}>\text{Cu}>\text{Se}>\text{Pb}, \text{Ni}, \text{Co}, \text{Cr}, \text{Mo}, \text{Ag}, \text{Tl}$
鳃	$\text{Ca}>\text{Mn}>\text{Fe}>\text{Mg}>\text{Zn}>\text{Na}>\text{K}>\text{Al}>\text{Cu}>\text{As}>\text{Pb}>\text{Ni}>\text{Se}>\text{Co}, \text{Cr}, \text{Mo}, \text{Ag}, \text{Tl}$
内脏团	$\text{Ca}>\text{Mn}>\text{Fe}>\text{K}>\text{Na}>\text{Zn}>\text{Mg}>\text{Al}>\text{As}>\text{Cu}>\text{Pb}>\text{Ni}>\text{Se}>\text{Co}, \text{Cr}, \text{Mo}, \text{Ag}, \text{Tl}$

表 5 背角无齿蚌各组织或器官元素的平均负荷量及全部软组织元素总负荷量(μg)
Table 5 Mean element burdens in various tissues and the whole soft body of *Anodonta woodiana*(μg)

元素	外套膜	闭壳肌	足	鳃	内脏团	总负荷量
Ca	35 034±29 232	2 640±2 389	1 712±1 763	120 358±51 177	71 517±44 855	231 261
Mn	6 995±7 606	514±476	395±420	16 601±9 652	14 756±10 038	39 261
Na	1 837±709	328±177	483±192	1 243±477	1 714±789	5 605
Fe	935±583	68±66	248±401	2 107±1 114	7 393±3 734	10 751
K	825±332	398±152	1 013±482	1 244±498	2 852±1 517	6 332
Mg	689±700	120±33	171±56	1 938±1 282	1 182±446	4 100
Zn	676±457	71±35	89±45	1 751±744	1 274±531	3 861
Al	65±78	21±54	2±3	252±319	125±171	465
Cu	5.582±6.320	0.127±0.251	0.351±0.760	14.907±16.893	6.800±7.056	27.767
As	2.429±2.562	0.108±0.268	0.462±0.838	8.867±5.959	10.495±6.863	22.361
Pb	0.596±0.661	0	0	2.624±2.500	4.273±4.209	7.493
Ni	0.058±0.139	0	0	1.539±1.185	0.754±0.630	2.352
Se	0.050±0.093	0.015±0.034	0.040±0.113	0.968±1.700	0.699±1.886	1.771
Cr	0.033±0.093	0	0	0	0	0.033
Co	0.038±0.107	0	0	0	0	0.038
Mo	0.018±0.052	0	0	0	0	0.018
Ag	0.002±0.006	0	0	0	0	0.002
Tl	0	0	0	0	0	0

注:表中数据为平均值±标准偏差;一些组织或器官中元素浓度低于检测限,其元素的负荷量以“0”计。

织中有 40%左右的 Ca、Mn、Mg、Zn、Al、Cu、As、Ni 和 Se 存在于鳃中,40%左右的 K、Fe、As、Se 和 Pb 存在于内脏团中。除 K 和 Na 外,80%以上的元素均积累在这两类组织中。同样,15%以上的 Na、Mg、Ca、Zn、Mn 和 Cu 存在于外套膜中,显示出其中的元素积累亦不容忽视。和其他元素不同的是,K 和 Na 在外套膜、闭壳肌和足中的量可分别占软组织总负荷量的 30%甚至近 50%,显示出了一定的特殊性。由于 Cr、Co、Mo、Ag 和 Tl 仅在外套膜中有微量检出,其他组织中则未检出,故软组织总负荷量极低。

3 讨论

3.1 背角无齿蚌体内元素的生理意义

背角无齿蚌软组织各器官中 Ca 的浓度均达到很高水平,其在鳃中浓度最高。水生动物为了维持体内电解平衡,必须不断地从周围水环境中富集离子,同时减少体内离子的损失,对于淡水贝类,Ca 的持续供应特别重要,除了用于维持体内外电解平衡,还用于贝壳和珍珠的形成、生长等^[5]。背角无齿蚌的鳃属于真瓣鳃型,具有两个左右对称的鳃瓣,着生于内脏团两侧,为外套膜内表皮延伸特化而成,是重要的呼吸和滤食器官^[16-17],贝类的鳃与水环境接触,能够直接有效地从水环境中吸收 Ca 以满足自身对 Ca 的需求。

李静等^[18]把放射性同位素 ⁴⁵Ca 注射到背角无齿蚌体内,发现 ⁴⁵Ca 在鳃中的分布系数最高。Pynnönen^[15]把无齿蚌 *Anodonta anatina* 分别放入含 ⁴⁵Ca 离子的水环境中 and 含 ⁴⁵Ca 藻类的水环境中,发现无齿蚌既能利用水体中的 Ca,也能利用食物中的 Ca,两种情况下均是鳃中 Ca 含量最高。本实验结果也显示鳃中 Ca 的浓度最大,可见背角无齿蚌的鳃也是重要的 Ca 代谢器官和积累器官。相关研究表明,Ca 在无齿蚌体内主要以钙结核(calcium concretions)的形态大量存在于鳃中的结缔组织,钙结核的主要成分是 Ca 和 P,其中 Mn、Fe、Zn 的含量也很高^[19-20]。关于钙结核的作用,Silverman 等^[21]的研究发现,淡水珠蚌在生殖季节鳃中钙结核会消失,并认为鳃中钙结核可能是钩介幼虫形成贝壳的重要钙源。

Mn 是人体及动、植物所必需量的微量元素之一,是精氨酸酶、丙酮酸羧化酶、超氧化物歧化酶等的组成成分,是水解酶、脱酰酶、脱羧酶、激酶、转移酶和肽酶等的激活剂^[22]。本实验结果显示背角无齿蚌鳃、外套膜和内脏团中 Mn 浓度均在 10⁴ μg·g⁻¹ 左右,同样在鳃中浓度最高。许多研究^[1,3,23]表明,淡水珠蚌类能够积累很高浓度的 Mn。据 Ravera 等^[9]的研究,在意大利湖泊 Maggiore 和 Candia 中的珠蚌 *Unio pictorum manicus* 体内 Mn 的浓度分别为 6 470 和 3 690 μg·g⁻¹。Campanella

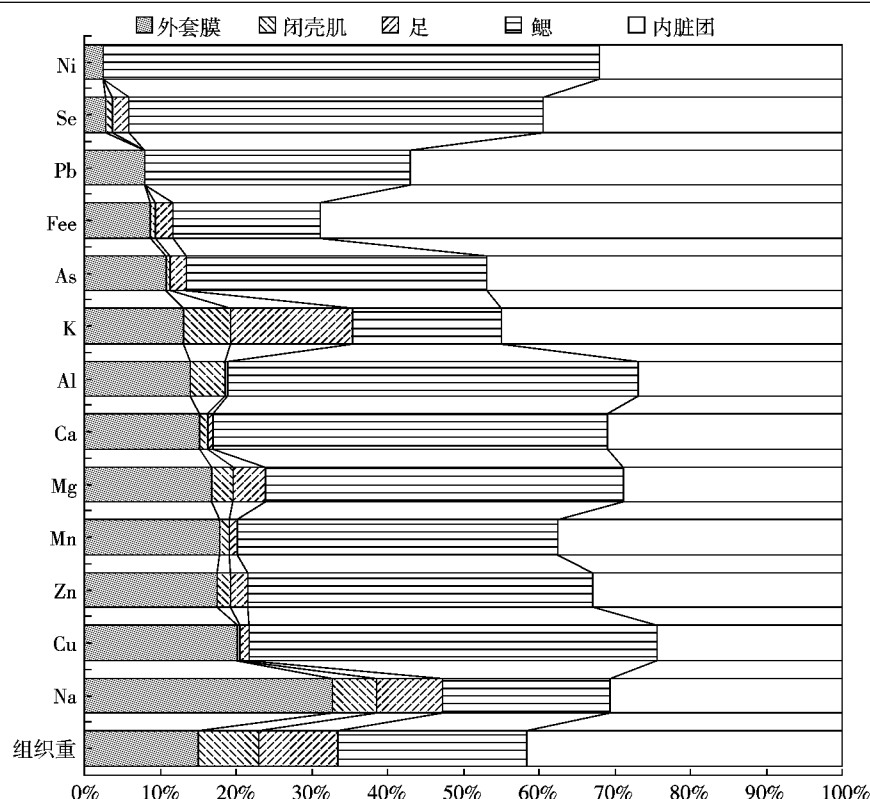


图 1 背角无齿蚌软体组织各器官元素负荷量和重量百分比 (Cr、Co、Mo、Ag 和 Tl 由于未检出或浓度极低,故未列入该图)

Figure 1 Percentage of tissular element burdens and weight in *Anodonta woodiana* (Cr, Co, Mo, Ag and Tl are excluded due to not detected or extremely low concentration)

等^[23]的研究表明 Mn 在珠蚌类抗自由基、抗氧化方面起很大作用,然而 Mn 在酶活性方面的作用不足以解释为什么淡水珠蚌类能够积累如此高浓度的 Mn。Mn 在蚌体内的富集机制和生理功能仍有待进一步研究。

Mg 是磷酸化酶、磷酸转移酶、脱羧酶和酰基转移酶等的辅基和激活剂,是细胞膜的重要构成成分,Zn 是碳酸酐酶、胰凝乳蛋白酶、谷氨酸脱氢酶等的组成成分^[24]。Mg 和 Zn 同时是碱性磷酸酶(ALP)的组成金属,是 ALP 的激活剂^[25],在背角无齿蚌体内 Mg、Zn 含量较高的器官顺序为:鳃>外套膜>内脏团。据施志仪等^[25]的研究,三角帆蚌外套膜的 ALP 有促进 Ca 代谢的作用,那么珠蚌体内较高含量的 Mg、Zn 能够增强 ALP 的活力,从而促进蚌体内 Ca 的代谢和积累。这是否可以成为珠蚌类体内 Ca 积累较高的原因之一,有待进一步的验证。

本研究发现背角无齿蚌鳃对 Al 的积累也很高,可能背角无齿蚌对 Al 有较强的富集能力,也可能与养殖用水中加入较多含 Al 絮凝剂有关,Al 对背角无齿蚌的生理作用未见报道。

Cu 是贝类血蓝蛋白的组成成分,作为血液的氧

载体参与氧的运输,也是细胞色素氧化酶、酪氨酸酶和抗坏血酸氧化酶的成分。Cu 既是生命体必需的微量元素,也是重金属元素,含量过高则会对机体产生不利的影响。在背角无齿蚌鳃和外套膜中的 Cu 含量要高出其他微量元素数倍,且鳃中最高。金属硫蛋白(metallothionein, MT)是 Zn 和 Cu 的主要储存蛋白,动物通过在体内合成金属硫蛋白来调节 Zn 和 Cu^[27-28]。

Fe 具有多种氧化状态,在细胞电子转运过程中起到很大作用^[26]。在本研究中发现 Fe 在内脏团中的浓度和负荷量均高于其他组织,可能内脏团中还原酶、氧化酶、水化酶、氢化酶、过氧化氢酶等的含量较高,而这些酶均是含 Fe 酶,至于 Fe 在内脏团中各器官的分布尚不可知,其生理学意义也不是很清楚,有待进一步的研究。

Na 主要分布在细胞外液,参与糖和氨基酸的主动转运^[24]。本实验结果显示 Na 在外套膜中的浓度是其他各器官的两倍多,而外套膜具有分泌形成贝壳和珍珠、帮助完成呼吸、摄食、排泄等多种功能,可能 Na 是外套膜中营养运输、物质转运的重要元素。K 对维持神经和肌肉的兴奋性有关^[24],足是背角无齿蚌的运动器官,

内脏团则是背角无齿蚌中枢神经存在的地方,其神经节存在于足中,本实验结果 K 在足中的浓度最高,可能 K 在足中的主要作用是神经电子传导。

元素 Ni 和 Se 均是人体必需微量元素, Ni 能够影响内分泌系统和免疫系统,并且适量的 Ni 对 DNA 和 RNA 发挥正常生理功能是必需和有益的^[21]; Se 是构成含硒蛋白与含硒酶的重要成分,在免疫应答方面具有重要作用^[22]。Ni 和 Se 均在背角无齿蚌体内检测出来,但是目前未见有关 Ni 和 Se 对贝类的生理作用方面的研究,二者是否是软体动物必需微量元素有待进一步研究。

背角无齿蚌鳃和内脏团中有毒元素 As、Pb 含量较高。杨健等^[23]的研究表明太湖水样中各重金属均未超过国家渔业水质标准(GB 11607—1989),但底泥和背角无齿蚌的结果显示出 Pb,特别是 Zn、As 的污染比较明显,残留浓度接近或超过了国家食品限量标准,本研究所用样本背角无齿蚌采自淡水渔业研究中心南泉基地,为自养蚌,养殖用水为经过初步过滤的太湖水。从实验结果可以看出,背角无齿蚌仍积累了很高浓度的 As 和 Pb,这些元素主要在鳃和内脏团积累,其中鳃中 As 的平均干重浓度超过 $8 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 内脏团中达 $6 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 在内脏团和足中的浓度值还超过了必需微量元素 Cu; 内脏团和鳃中 Pb 的干重浓度超过或接近 $3 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 可见背角无齿蚌对有毒元素 As 和 Pb 的富集能力很高。由于本研究的背角无齿蚌来自养殖池塘环境,今后应注意对这两种元素的形态和来源及对水产品质量安全的影响进行进一步调查和研究。

Cr、Co、Mo、Ag、Tl 5 种元素在外套膜中的浓度极低,在其他组织中则低于检测限,这些元素对背角无齿蚌是否有某种生理作用也尚未见相关研究。

3.2 背角无齿蚌体内元素的组织选择性和负荷量

本研究的结果表明,18 种元素在背角无齿蚌的不同组织或器官中的浓度和负荷量均具有明显的选择性积累。贝类属于底栖滤食性动物,既能吸收水中溶解态元素,也能吸收食物颗粒态元素,前者主要通过贝类体表直接吸收,后者则通过食道来吸收^[30]。可以推论,背角无齿蚌的鳃是各元素的主要结合位点,其次是内脏团和外套膜,可能鳃中积累的各元素主要是靠直接吸收水体中溶解态元素得来的,内脏团则主要靠食物中颗粒态元素得来,同时贝类组织中各元素的积累又是组织间不断转运不断交换的结果,血液在其中起到了很大作用,血细胞通过胞质蛋白或溶酶体运输金属,金属被转运到相应组织中发挥

其生理功用^[20]。与其他动物比较,双壳类污染物代谢酶的活性非常低^[2],因此其组织内污染物浓度能够反映特定水环境中污染物的长期动态变化。本研究背角无齿蚌组织或器官中元素的积累浓度也应该和生境中这些元素的长期积累相关。

组织或器官中元素的浓度主要与其生理功能或解毒机制有关,而负荷量则主要反映元素在不同组织或器官中实际的量。后者可以较客观地反映不同组织或器官对背角无齿蚌整体微量元素积累的贡献率大小。虽然许多元素负荷量的较大部分存在于重量较大的组织或器官中,但也会有一些元素(如 Na)相当部分的负荷量会存在于重量较小的组织或器官(如外套膜)中(图 1)。其相应的贡献率不能忽视。

由于个体较小,本研究未能从内脏团中分离出胃、肠、消化腺、肝脏、肾脏等器官,然而胃、肠和消化腺是重要的金属吸收器官,肝脏和肾脏是重要的金属解毒和排出器官^[20,30],各元素在这些器官中的浓度分布特征仍不是很清楚,今后需要采集更大个体开展进一步研究。

4 结论

(1)背角无齿蚌软组织各器官中的元素浓度和负荷量差别均较大。总体来说,鳃、外套膜和内脏团中各元素浓度较高,足和闭壳肌中相对较低;鳃和内脏团中各元素负荷量较高,外套膜次之,闭壳肌和足中较低。各器官元素浓度大小顺序并不一致,各组织对元素具有一定选择积累能力。

(2)Ca、Mn、Mg、Zn、Al、Cu、Ni、As 和 Se 9 种元素浓度均在鳃中最高,Na 在外套膜中浓度最高,Fe 和 Pb 在内脏团中浓度最高,K 在足中浓度最高。有毒元素 As 和 Pb 在鳃和内脏团中的浓度相对较高。

(3)从元素负荷量来看,有 40%左右的 Ca、Mn、Mg、Zn、Al、Cu、As、Ni 和 Se 存在于鳃中,40%左右的 K、Fe、As、Se 和 Pb 存在于内脏团中,近 50%Na 积累在外套膜、内脏团和鳃中。这些组织或器官对背角无齿蚌体内相应元素的生物积累的贡献率不能忽视。

参考文献:

- [1] Ravera O, Cenci R, Maria Gian, et al. Trace element concentrations in freshwater mussels and macrophytes as related to those in their environment[J]. *Journal of Limnology*, 2003, 62(1): 61–70.
- [2] Tanabe S, Subramanian A. Bioindicators of POPs: monitoring in developing countries[M]. Kyoto: Kyoto University Press & Melbourne: Trans Pacific Press, 2006: 38–41.

- [3] Ravera O, Beone G M, Trinchieri P R, et al. Seasonal variations in metal content of two *Unio pictorum manicus* (Mollusca, Unionidae) populations from two lakes of different trophic state[J]. *Journal of Limnology*, 2007, 66(1):28-39.
- [4] Farrington J W, Goldberg E D, Risebrough R W, et al. U. S. "Mussel Watch" 1976-1978: An overview of the trace-metal, DDE, PCB, hydrocarbon, and artificial radionuclide data [J]. *Environmental Science & Technology*, 1983, 17(8):490-496.
- [5] Goldberg E D. The mussel watch concept[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1986, 7(1):91-103.
- [6] 贾晓平. 南海海洋渔业可持续发展研究[M]. 北京: 科学出版社, 2003. JIA Xiao-ping. Study on the sustainable development of marine fishery in South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [7] Camusso M, Balestrini R, Binelli A. Use of zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) to assess trace metal contamination in the largest Italian subalpine lakes[J]. *Chemosphere*, 2001, 44(2):263-270.
- [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[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.
- [9] Soroka M. Genetic variability among freshwater mussel *Anodonta woodiana* (Lea, 1834) (Bivalvia: Unionidae) populations recently introduced in Poland[J]. *Zoological Science*, 2005, 22(10):1137-1144.
- [10] 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.
- [11] 刘洪波, 杨 健, 甘居利. 太湖重点水域背角无齿蚌中汞的残留特征[J]. 上海环境科学, 2009, 28(3):106-109. LIU Hong-bo, YANG Jian, GAN Ju-li. Monitoring of mercury residues in the bivalve mussels *Anodonta woodiana* from the Taihu Lake, China [J]. *Shanghai Environmental Science*, 2009, 28(3):106-109.
- [12] Yang J, Harino H, Liu H B, 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(2):164-168.
- [13] 边学森, 刘洪波, 甘居利, 等. 太湖背角无齿蚌中多氯联苯的残留[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2):767-772. BIAN Xue-sen, LIU Hong-bo, GAN Ju-li, et al. Residues of PCBs in *Anodonta woodiana* from the Taihu Lake, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2):767-772.
- [14] Bian X S, Liu H B, Gan J L, et al. HCH and DDT residues in bivalves *Anodonta woodiana* from the Taihu Lake, China [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009, 56(1):67-76.
- [15] Pynnönen K. Accumulation of ^{45}Ca in the freshwater Unionids *Anodonta anatina* and *Unio turnidus*, as influenced by water hardness, protons, and aluminum[J]. *The Journal of Experimental Zoology*, 1991, 260(1):18-27.
- [16] 从 宁, 袁莉民. 背角无齿蚌外套膜和鳃瓣的扫描电镜初步观察[J]. 水生生物学报, 1993, 17(3):288-289. CONG Ning, YUAN Li-min. Preliminary scanning electron microscopic observations on mantle and gill lamella of *Anodonta woodiana* Lea[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1993, 17(3):288-289.
- [17] Gómez-Mendikute A, Elizondo M, Venier P, et al. Characterization of mussel gill cells in vivo and in vitro[J]. *Cell and Tissue Research*, 2005, 321(1):131-140.
- [18] 李 静, 石安静, 莫尚武, 等. ^{45}Ca 在圆背角无齿蚌体内的代谢与分布[J]. 水生生物学报, 2002, 26(2):188-191. LI Jing, SHI An-jing, MO Shang-wu, et al. Metabolism and distribution of calcium in *Anodonta woodiana pacifica* (heuda) traced by ^{45}Ca [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2002, 26(2):188-191.
- [19] Pynnönen K, Holwerda D A, Zandee D I. Occurrence of calcium concretions in various tissues of freshwater mussels, and their capacity for cadmium sequestration[J]. *Aquatic Toxicology*, 1987, 10(2-3):101-114.
- [20] Marigómez I, Soto M, Cajaraville M P, et al. Cellular and subcellular distribution of metals in molluscs[J]. *Microscopy Research and Technique*, 2002, 56(5):358-392.
- [21] Silverman H, Kays W T, Dietz T H. Maternal calcium contribution to glochidial shells in freshwater mussels (Eulamellibranchia: Unionidae) [J]. *Journal of Experimental Zoology*, 1987, 242(2):137-146.
- [22] 王 夔. 生命科学中的微量元素[M]. 第二版. 北京: 中国计量出版社, 1996. WANG Kui. Trace elements in life science[M]. The Second Edition. Beijing: China Metrology Publishing House, 1996.
- [23] Campanella L, Gatta T, Ravera O. Relationship between anti-oxidant capacity and manganese accumulation in the soft tissues of two freshwater molluscs: *Unio pictorum manicus* (Lamellibranchia, Unionidae) and *Viviparus ater* (Gastropoda, Prosobranchia)[J]. *Journal of Limnology*, 2005, 64(2):153-158.
- [24] 李爱杰. 水产动物营养与饲料学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996. LI Ai-jie. Nutrition and feed of aquatic animals[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1996.
- [25] 施志仪, 李 勇, 谢先中. 三角帆蚌外套膜碱性磷酸酶与钙代谢的关系[J]. 上海水产大学学报, 2008, 17(3):291-297. SHI Zhi-yi, LI Yong, XIE Xian-zhong. Relations between alkalinity phosphatase and calcium metabolism in mantle of *Hyriopsis cumingii* [J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2008, 17(3):291-297.
- [26] Ash C, Stone R. A question of dose[J]. *Science*, 2003, 300(5621):925.
- [27] Kägi J H R. Overview of metallothionein [J]. *Methods in Enzymology*, 1991, 205:613-626.
- [28] Orihuela R, Domènech J, Bofill R, et al. The metal-binding features of the recombinant mussel *Mytilus edulis* MT-10-IV metallothionein[J]. *Journal of Biological Inorganic Chemistry*, 2008, 13(5):801-812.
- [29] Rayman M P. The importance of selenium to human health [J]. *The Lancet*, 2000, 356(9225):233-241.
- [30] Naimo T J. A review of the effects of heavy metals on freshwater mussels[J]. *Ecotoxicology*, 1995, 4(6):341-362.

致谢: 闻海波同志在蚌的解剖方面给予了指导, 叶珊珊同学在研究过程中给予了很大帮助, 在此深表谢意。