

博士后研究工作報告

微量元素在几种水生动物中的积累和生物学意义

Accumulation characteristics of trace elements  
in some aquatic animals and their biological significances

杨 健

中国科学院水生生物研究所

分类号\_\_\_\_\_

密级\_\_\_\_\_

UDC \_\_\_\_\_

编号\_\_\_\_\_

中国科学院水生生物研究所

博士后研究工作报告

微量元素在几种水生动物中的积累和生物学意义

---

---

杨 健

工作完成日期 2002 年 5 月—2004 年 5 月

---

报告提交日期 2004 年 6 月

---

中国科学院水生生物研究所（湖北武汉）

2004 年 6 月

微量元素在几种水生动物中的积累和生物学意义

Accumulation characteristics of trace elements  
in some aquatic animals and their biological significances

博士后姓名 杨 健

流动站(一级学科)名称 中国科学院水生生物研究所

专业(二级学科)名称 水生生物学

研究工作起始时间 2002 年 5 月

研究工作期满时间 2004 年 5 月

中国科学院水生生物研究所

2004 年 6 月

## 内容摘要

本文对几种有代表性的水生动物体内微量元素的积累和生物学意义,从必需元素的生物需求和生物利用,有害元素的生物积累和生物监测,以及利用微量元素作为生物标志物,“复原”长江洄游鱼类其生活史和洄游履历等方面进行了探索。

本文的主要结果是:

1. 淡水白鱃豚和长江江豚体内肝脏对 Cu, 皮肤对 Zn, 肾脏对 Cd 显现出特殊的积累,还初步确定了长江江豚的 Pb 和 As, 白鱃豚“淇淇”体内的 Al、As、Se 和 Mo 的分布类型及积累水平。
2. 饲养条件下长江江豚微量元素的摄入量显示,必需元素的每周预计摄入量在 WHO/FAO 提出的人类每周耐受摄入量的范围,而有毒元素 Cd、As 和 Pb 的每周预计摄入量则大大高于允许的耐受摄入量。
3. 太湖五里湖微量元素的“背角无齿蚌类观察”显示,水中 Zn、Cu、As、Pb 和 Cd 的残留浓度均未超过国家渔业水质标准 (GB11607-890),然而背角无齿蚌的结果反映出 Zn、As、Pb 的污染比较明显。强毒性的 Cd 也在蚌样中检出。淡水的背角无齿蚌能够起到微量元素污染监测的生物指示物的作用。
4. 日本三陆沿岸水域的白胸拟鼠海豚母体和胎儿体内丁基锡和苯基锡的结果表明,母体明显受到了丁基锡 (TBT, DBT,

MBT) 和苯基锡 (TPT, DPT, MPT) 的污染, 但程度明显低于人类活动较频繁的日本东南部水域的江豚。母体的肝脏不仅是 TBT, DBT, MBT, 而且是 TPT, DPT, MPT 积累的“靶器官”。证实了白胸拟鼠海豚体内丁基锡类和苯基锡类均能通过胎盘传送给胎儿, 从而导致两世代污染。

5. 耳石的电子微探针波长色散 X-射线衍射分析和 X-射线强度图像化分析技术测定 Sr 和 Ca 的浓度结果表明, 长江洄游鱼类凤鲚、刀鲚、鲮鱼、窄体舌鳎、棘头梅童鱼的洄游类型和群体构成可能存在着多样性。

关键词: 微量元素, 水生动物, 积累, 生物学意义

## Abstract

In the present study several representative aquatic animals were investigated on accumulation of trace elements and their significance of biological requirement. Additionally/Also we studied the bioavailability of essential elements and the bioaccumulation of toxic elements and monitored the toxic elements and we tracked the life history and the recovering of the environment along the migration route of some Changjiang migratory fishes. The main results in this thesis can be summarized as follows:

1. Tissue or organ specific accumulation of trace element was found for Copper (Cu) in the liver, for Zinc (Zn) in the skin and for Cadmium (Cd) in the kidneys in the Chinese river dolphin (*Lipotes vexillifer*) and in the finless porpoise (*Neophocaena phocaenoides*). Also, we ascertained the distribution pattern and level of Lead (Pb) and Arsenic (As) for the Changjing finless porpoise, and Aluminium (Al), As, Selenium (Se) and Molybdenum (Mo) for the “Qi Qi”, a captive Chinese river dolphin.
2. Based on the study on 3 captive finless porpoises, the estimated weekly intakes of the essential elements Cu and Zn were similar to the Provisional Tolerance Weekly Intake (PTWI) for human (suggested by WHO/FAO). However, the intake of highly toxic Pb, Cd and As was much higher than the PTWI of human, suggesting that it is necessary to find a safety criterion for the food of captive cetaceans.
3. Although the concentration of all studied elements in water samples of the Wulihu (area of the Taihu lake) did not overrun the National Water Puality Standard for Fisheries (GB 11607—89), a contamination of Pb, Zn and As was emerged in samples of *Anodonta woodiana*. It is feasible to monitor and assess the contamination status of these elements by studying *Anodonta woodiana* as a bioindicator (“Mussel Watch”). The residual contents of Pb, Cd and especially Zn, As in this edible mussel may be deleterious to health of consumers.
4. The maternal to fetal transfer of organotins including butyltins (BTs) of TBT, DBT, MBT and phenyltins (PTs) of TPT, DPT, and MPT was investigated in a mother-fetus pair of Dall’s porpoises (*Phocoenoides dalli*) collected off the Sanriku coast, Japan. The maternal individual was obviously contaminated by all the investigated organotin compounds. A two-generation contamination of organotins was demonstrated. The maternal to fetal transplacental transfer of organotins in the Dall’s porpoise included not only for butyltins, but also for phenyltins.
5. Strontium (Sr) and Calcium (Ca) concentration in the otolith of the Changjiang migratory fishes in this thesis analyzed by wavelength-dispersive X-ray spectrometry on an electron microprobe and X-ray intensity maps technologies suggested that there will be diverse for the migratory pattern and group composition of *Coilia mystus*, *Coilia ectene*, *Mugil cephalus*, *Cynoglossus gracilis* and *Collichthys lucidus*.

Key words: Trace element, Accumulation, biological significance, aquatic animal.

# 微量元素在几种水生动物中的积累和生物学意义

## 目录

1 前言	1
1.1 微量元素	1
1.2 水生动物体内微量元素积累的研究概述	3
1.3 本文工作简介	11
2 鲸类动物体内微量元素积累的研究	13
2.1 长江江豚微量元素的需求和积累	13
2.1.1 材料与方法	14
2.1.2 结果与分析	16
2.1.2.1 Zn、Cu、Pb、Cd、As 在食物鲫鱼体内的积累	16
2.1.2.2 饲养长江江豚 Zn、Cu、Pb、Cd、As 的估计每天摄入量	17
2.1.2.3 Zn、Cu、Pb、Cd、As 在江豚体内的分布	18
2.1.3 讨论	19
2.1.3.1 饲养江豚微量元素的摄入量	19
2.1.3.2 微量元素在长江江豚组织中的分布	21
2.1.4 小结	23
2.2 饲养条件下白鱀豚的微量元素积累的初步研究	24
3 “贝类观察”和“鲸类观察”监测水体微量元素污染	27
3.1 中国太湖五里湖水域背角无齿蚌的微量元素“贝类观察”	27
3.1.1 材料与方法	28
3.1.1.1 样品采集	28
3.1.1.2 材料	29
3.1.1.3 消化与测定方法	30
3.1.1.3.1 蚌样的消化	30
3.1.1.3.2 泥样的消化	30
3.1.1.3.3 微量元素的测定	31

3.1.1.4 结果与分析	31
3.1.1.4.1 水样中微量元素的浓度	31
3.1.1.4.2 五里湖底泥中微量元素的浓度	32
3.1.1.4.3 五里湖背角无齿蚌样本中微量元素的浓度	34
3.1.1.5 小结	37
3.2 日本三陆沿岸水域白胸拟鼠海豚母体及胎儿的有机锡污染	38
3.2.1 材料与方法	38
3.2.2 结果	40
3.2.2.1 有机锡浓度的分布	40
3.2.2.2 有机锡负荷量的比较	41
3.2.2.3 有机锡组成的比较	43
3.2.3 讨论	43
3.2.4 结论	46
4 长江口鱼类耳石中微量元素的微化学	47
4.1 材料与方法	48
4.2 结果和讨论	50
4.2.1 凤鲚与刀鲚	50
4.2.2 鲻鱼	55
4.2.3 窄体舌鳎	56
4.2.4 棘头梅童鱼	58
4.2.5 结论	59
5.总结	60
参考文献	64
致谢	79
博士生期间发表的学术论文, 专著	80
博士后期间发表的学术论文, 专著	82
个人简历	84
永久通信地址	92



## 附表清单

1.	表 1.1-1 淡水和海水主要微量元素成分比较	2
2.	表 2.1.1-1 研究动物的资料	15
3.	表 2.1.2.1-1 饲养长江江豚食物鲫鱼体内 Cu、Zn、Pb、Cd、As 五种元素的浓度	17
4.	表 2.1.2.2-1 饲养长江江豚食物鲫鱼的摄食量	17
5.	表 2.1.2.2-2 饲养江豚的微量元素每日估计摄入量	18
6.	表 2.1.3-1 一头江豚 10 种组织或器官中 Cu、Zn、Pb、Cd、As 的浓度	19
7.	表 2.1.3.1-1 饲养江豚微量元素每周预计摄入量与人暂定每周耐受摄入量的比较	21
8.	表 2.1.3.2-1 不同水域江豚组织或器官中微量元素的浓度比较	22
9.	表 2.2-1 白鱀豚“淇淇”组织或器官中微量元素的浓度	25
10.	表 2.2-2 文献中白鱀豚组织或器官中微量元素的浓度	26
11.	表 3.1.1.2-1 背角无齿蚌样本基本参数表	29
12.	表 3.1.1.2-2 背角无齿蚌软组织湿重和干重比率	30
13.	表 3.1.1.4.1-1 水样本中微量元素浓度及与国家相应标准的比较	32
14.	表 3.1.1.4.2-1 底泥中的重金属浓度及与国家相应标准的比较	34
15.	表 3.1.1.4.3-1 背角无齿蚌样本中微量元素的含量及与国家相应标准的比较	36
16.	表 3.1.1.4.3-2 各微量元素在背角无齿蚌体内的生物累积因子	36
17.	表 3.2.1-1 研究动物的资料	39
18.	表 3.2.2.1-1 日本三陆沿岸白胸拟鼠海豚母体和胎儿各组织和器官中有机锡污染物的浓度	40
19.	表 3.2.2.2-1 日本三陆沿岸白胸拟鼠海豚母体中有机锡污染物的负荷量	42
20.	表 3.2.2.2-2 白胸拟鼠海豚胎儿体内有机锡污染物的负荷量	42
21.	表 4.1-1 本研究鱼类标本的资料	49

## 插图清单

1.	图 3.1.1.1-1 太湖五里湖采样点示意图	28
2.	图 4.2.1-1 凤鲚耳石标本矢状面二维 Sr 和 Ca 浓度 X-射线强度图像化分析	51
3.	图 4.2.1-2 沿凤鲚耳石标本矢状面从核心到边缘的检测样线 记录到的 Sr:Ca 比率的变化	51
4.	图 4.2.1-3 刀鲚耳石标本矢状面二维 Sr 和 Ca 浓度 X-射线强度图像化分析	53
5.	图 4.2.1-4 沿刀鲚耳石标本矢状面从核心到边缘的检测样线 记录到的 Sr:Ca 比率的变化	53
6.	图 4.2.2-1 鲮鱼耳石标本矢状面二维 Sr 和 Ca 浓度 X-射线强度图像化分析	55
7.	图 4.2.2-2 沿鲮鱼耳石标本矢状面从核心到边缘的检测样线 记录到的 Sr:Ca 比率的变化	56
	图 4.2.3-1 窄体舌鲮耳石标本矢状面二维 Sr 和 Ca 浓度 X-射线强度图像化分析	57
8.	图 4.2.3-2 沿窄体舌鲮耳石标本矢状面从核心到 边缘的检测样线记录到的 Sr:Ca 比率的变化	57
9.	图 4.2.4-1 棘头梅童鱼耳石标本矢状面二维 Sr 和 Ca 浓度 X-射线强度图像化分析	58
10.	图 4.2.4-2 沿棘头梅童鱼耳石标本矢状面从核心到 边缘的检测样线记录到的 Sr:Ca 比率的变化	59

# 1 前言

## 1.1 微量元素

自然界大约存在着 90 种元素。除去被称为常量元素的碳(C)、氢(H)、氧(O)、氮(N)、硫(S)、磷(P)、钾(K)、钠(Na)、氯(Cl)、镁(Mg)、钙(Ca)和惰性气体的氦(He)、氖(Ne)、氩(Ar)、氪(Kr)、氙(Xe)、氡(Rn)，其余的约 73 种元素一般被统称为微量元素(trace element) (钙亦被某些研究者列入微量元素)。其中，铁(Fe)、锌(Zn)、铜(Cu)、碘(I)、钴(Co)、铬(Cr)、氟(F)、钼(Mo)、硒(Se)、锰(Mn)、镍(Ni)、钒(V)、硅(Si)、锂(Li)和砷(As)被称为必需元素，因为身体一旦缺乏，生理功能将会失调。其余的归为非必需元素。而汞、镉、铅等非必需元素即使是很低的浓度，也会给生命活动造成危害，因此常被称为有害元素(Vandecasteele and Block, 1993; Mertz 著, 朱莲珍主译 1994)。当然，上述分类也在发生变化，以砷为例，随着毒性越来越被了解，它已变为全球最受关注的有害元素 (Oremland and Stolz, 2003)。微量元素的研究中有害元素经常会被笼统的称为重金属(heavy metal) (Hodson, 2004)。近年来，随着分析测试手段的进步，水生动物微量元素的营养化学和毒理学业已成为最为活跃的研究领域之一。

水生动物直接或间接（如通过食物链等）从水环境中吸收必需元素，同时该过程亦使许多非必需元素进入体内，甚至导致公害病，如汞中毒的水俣病、镉中毒的痛痛病等。水生动物主要生活在淡水和海水环境中。两者之间的元素成分有着很大的差异（表 1.1-1）(王夔, 1991)，特别是海水中 B（硼）、Ca、F（氟）、I（碘）、Li、Rb（铷）、Sr（锶）

等有着很高的含量，而淡水中 Al（铝）、Fe、Si（硅）等微量元素的含量较海水为高。这些差异很有可能在水生动物体内微量元素的积累特征中得到反映。通过对这些积累特征的深入研究，我们同样可以获得大量水生动物生态学、生理学等方面的重要信息。

如果检索一下科学引文索引刊物库（SCI）的话，就会发现每年都有大量有关水生动物微量元素的论文发表。这些研究成果给我们提供了一个庞大的数据库。以水生哺乳动物为例，已有 70 种 10246 头个体进行过微量元素的研究（O’Shea 和 Tanabe, 2003）。

表 1.1-1 淡水和海水主要微量元素成分比较\*

Table 1.1-1 Comparison of trace element composition between freshwater and sea water

元素 Element	浓度 (µg/L)Concentration		元素 Element	浓度 (µg/L)Concentration	
	淡水** Freshwater	海水 Sea water***		淡水** Freshwater	海水*** Sea water
Ag	0.3	0.04	I	2	60
Al	300	2	Li	2	180
As	0.5	3.7	Mn	8	0.2
Au	0.002	0.004	Mo	0.5	10
B	15	4400	Ni	0.5	0.56
Ba	10	13	Pb	3	0.03
Be	0.3	0.0056	Rb	1	120
Bi	0.02	0.02	Sb	0.2	0.24
Ca	15000	412000	Sc	0.01	0.0006
Cd	0.1	0.11	Se	0.2	0.2
Ce	0.2	0.0012	Si	7000	2200
Co	0.2	0.02	Sn	0.009	0.004
Cr	1	0.3	Sr	70	7900
Cs	0.02	0.3	Ti	5	1
Cu	3	0.25	U	0.4	3.2
F	100	1300	V	0.5	2.5
Fe	500	2	W	0.03	2.5
Ga	0.09	0.03	Zn	15	4.9
Hg	0.1	0.03	Zr	0.8	0.03

\*数据引自王夔（1991）；\*\*中值；\*\*\*平均值。

\*Data cited from Wang (1991); \*\* Median; \*\*\*Mean.

## 1.2 水生动物体内微量元素的研究概述

生命的初期进化是在海洋中进行的。没有微量元素的参与,地球上的生命将无法出现(Nriagu, 2003)。地球上的生物在演化过程中被认为是按照丰度规则(存在较丰富)、生物可利用规则(生物利用度高)、有效规则(选择较有效的元素化合物加以利用)、基本适合规则(被选择元素一定具有特定功能)、有效性和特异性的进化规则(元素功能需与生物大分子结合成特定形式下才能完成)选择元素(王夔, 1991);从而形成了现存的各种动物类群体内微量元素极具多样性的分布形式。参照 Suedel 等(1994)的论述,水环境的微量元素主要通过水体来源的生物浓缩(bioconcentration)和食物来源的生物积累(bioaccumulation)作用进入水生动物体内。如果上述作用在经过2个或更多的营养级后,导致动物组织中的元素浓度增高,因而被称为生物放大(biomagnification)作用。进入生物体内后的微量元素将呈现出各种生物利用(bioavailability)的特征。所有这些过程都极具有研究价值。目前,水生动物微量元素的研究总体上可以分为3类:(1)必需元素的生物需求和生物利用,(2)有害元素的生物积累和生物放大,(3)利用微量元素作为生物指示物,从一个新的角度来研究未知的水生动物的生态学难题。

在必需元素的生物需求和生物利用方面,铜、锌、铁和硒的研究较为多见。水环境中的铜能通过食物链被转移和积累,但生物放大作用不明显。大量的金属酶和金属蛋白的组成需要铜来参与。比如由于特殊的生理需要,铜在蟹类和牡蛎身体内的积累可比其它动物高很多倍。铜在构成呼吸色素血蓝蛋白(the respiratory pigment hemocyanin)中起重要作用

用，因此在一些软体动物和节肢动物血液中会有明显的积累（Suedel 等，1994）。研究发现鱼类和海鸟类组织中的铜的浓度都与种类和分布地关系不大。然而，组织间的存在着明显的浓度差（肝脏>肾脏>肌肉），显示出体内良好的生理和代谢调节机制。类似的机制同样出现在鳍脚类和鲸类。鳍脚类体内铜的积累水平或负荷量受地理位置的影响不大，但受食物来源的影响十分明显（Thompson, 1990）。罗斯海豹（*Ommatophoca rossi*）铜积累的水平很高，原因是其主要的食物乌贼体内铜的浓度相对较高（McClurg, 1984）。鲸类组织中铜的水平与体长和体重的增长呈负相关，反映出体内铜的代谢周转特征（Thompson, 1990）。

锌对生命活动有着重要意义。有 200 种以上的金属酶需要锌作为辅基。基因的表达、膜结构的稳定、神经系统的正常发育和功能维持等都与锌有关（Goyer 和 Clarkson, 2001）。水体食物网中的锌的转移并不会导致生物放大。双壳类软体动物对锌有特殊的积累，显示出一种特别的生理需求。鱼类体内锌的浓度与种类、分布水域、年龄或体长增加无关，且草食和肉食鱼类具有相同的组织水平（Suedel 等，1994）。对海鸟来说，肝和肾脏的浓度相当，都比肌肉的浓度要高。肾脏锌的浓度高的个体被发现镉的浓度亦高。可能反映出含锌的金属硫蛋白（metallothionein）参与了对镉的解毒。鳍脚类和鲸类锌的组织浓度亦无地理和种类的区别。鳍脚类肝脏锌的浓度最高，而鲸类肾脏可高于肝脏。白胸拟鼠海豚（*Phocoenoides dalli*）的肾脏中锌的浓度与镉有极其显著的正相关，并被进一步证实金属硫蛋白（metallothionein）参与了对镉的解毒（Yang, 2002; Yang 等，2004）。另外，无毛无腺的鲸类皮肤中锌的积累浓度极其高（最

高可达 3358  $\mu\text{g/g}$  干重浓度), 可能与其较强的外伤恢复能力有关 (Yang 等, 2002)。

铁是一些重要的金属蛋白 (包括血红蛋白、肌红蛋白) 和众多金属酶的必需成分 (Thompson, 1990)。人体大约含有 3-5 克铁, 67%与血红蛋白结合, 10%存在于肌红蛋白和含铁的酶。其余的结合于铁的储存蛋白——铁蛋白(ferritin)和血铁质(hemosiderin)中 (Goyer 和 Clarkson, 2001)。海洋鱼类肝脏和肾脏中铁的含量略高于肌肉。海鸟肝脏中铁的浓度可以比肾脏和肌肉高很多。雄性阿德利企鹅 (*Pygoscelis adeliae*) 交配后的绝食 (starvation) 期, 可将肌肉中的铁再分配到肝脏, 从而比雌性个体肝脏中铁的水平明显增高 (Thompson, 1990)。鳍脚类和鲸类脾脏、肝脏、肺和肌肉中铁的浓度均非常高。潜水生活的哺乳动物可储存大量的氧气在骨骼肌中, 肌红蛋白正是起着储氧载体的作用 (Castellini 和 Somero, 1981; Noren 和 Williams, 2000)。Yang 等 (2003) 发现肝脏中铁的浓度与最大潜水持续时间之间呈正相关。这可能是有潜水习性的水生高等动物 (如海鸟、鳍脚类, 鲸类) 的普遍特点。这种现象与铁的储存有关。

硒有着非常重要的生化和营养功能。动物体内的绝大部分硒以两种形式出现, 即 Selenomethionine 和硒代半胱氨酸 (Selenocysteine) (Goyer 和 Clarkson, 2001)。抗氧化作用是硒的生化作用的基础。硒的缺乏可导致人类的“克山病”和大骨节病(王夔, 1991)。硒还被发现对有害元素 (如汞, 镉等) 有解毒作用 (Mertz 著, 朱莲珍主译 1994)。硒可以通过水体食物链由初级生产者向高级消费者转换, 但捕食者 (如鱼类) 和其被食物

(如浮游生物)的组织积累水平相当,无生物放大作用(Suedel 等, 1994)。在某些海洋鱼类的肌肉、海鸟的肾脏和肝脏、鳍脚类的肝脏, 鲸类的肝脏和肌肉中记录到了硒浓度和年龄呈正相关(Thompson, 1990)。海洋哺乳动物体内硒被证实参与了对汞的解毒(O'Shea, 1999), 但尚未发现对其它有害金属解毒的报道。Yang 等(2002)发现硒在鲸类的皮肤中有特殊的高浓度积累(最高可达 2619  $\mu\text{g/g}$  干重浓度), 可能是与防护太阳紫外线伤害的一种保护性机制有关。

在有害元素的生物积累和生物放大方面, 一些已知对人有害的种类或化合物(如汞、镉、有机锡、砷等)是研究的热点。在漫长的自然进化过程中, 水生生物具备了与利用环境中的微量元素相适应的体内平衡机制, 也产生了某些有害元素的解毒机制。正常情况下水生生物体内微量元素的积累水平, 应该反映出上述两种机制调节的有效性。由于生物都是处于非平衡的稳态(内稳态), 所有的调节机制将只能在一定范围内有效(王夔, 1991)。因此, 大量的人类的开发和生产活动来源的微量元素进入水环境将极大地威胁水生生物调节能力, 从而使之更易受到微量元素的毒害, 尤其是处于食物链较高层次的水生高等动物。自然界的汞主要以无机态  $\text{Hg}^0$  和  $\text{Hg}^{2+}$  存在。水体中的无机汞被微生物甲基化后随食物链累积。甲基汞的毒性远大于  $\text{Hg}^0$  和  $\text{Hg}^{2+}$ 。淡水和海水生态系统均记录到了生物放大现象, 且以甲基汞为甚。May 等(1987)对不同营养级的水生生物中无机和甲基汞的比率关系进行了研究。藻类中无机汞的比率非常高(总汞的 85-86%), 甲基汞的比率却很低(总汞的 14-15%)。贻贝类中两者较为接近, 无机汞为总汞的 44-80%, 甲基汞为总汞的 20-56%。



鱼类中的无机汞的比率很低(总汞的 1-26%),而甲基汞的比率非常高(总汞的 74-99%),被认为是水域食物网中甲基汞最主要的提供者,因其较高的脂溶性而通过食物链转移和放大(Suedel 等, 1994)。海鸟肝脏中汞的浓度相对较高(但很少超过 20 $\mu\text{g/g}$  干重),高于肾脏、肌肉和卵。肝脏中有机汞所占的比例因种类不同而变化很大,从最小的 3%到最大的 100%。鳍脚类和鲸类肝脏中汞的浓度最高,肾脏和肌肉次之。组织中的浓度可能受到食物种类和与年龄增长相关的积累的影响。主要以海洋低等动物为食的海象(*Odobenus rosmarus*)和须鲸类组织中的汞浓度较低,而主要以鱼类为食的海豹类和齿鲸类显示出较高的浓度水平(Thompson, 1990; O'Shea, 1999)。迄今,对不下 180 头须鲸个体进行过肝脏汞浓度的调查,最高也不过 11  $\mu\text{g/g}$  干重;而齿鲸类中超过 100  $\mu\text{g/g}$  干重的现象很普遍(Das, 2003)。齿鲸类被称为是地球上最强的汞积累动物。日本水俣病患者肝脏汞浓度约为 73-231  $\mu\text{g/g}$ ,而在地中海采集到的瓶鼻海豚(*Tursiops truncatus*)的肝脏浓度高达 13150  $\mu\text{g/g}$  干重(Leonzio 等, 1992)。Koeman 等(1973)首先报道了海洋哺乳动物肝脏中存在汞和硒以 1:1 摩尔浓度增加的现象,并认为是对汞的解毒机制。随后这种现象在许多齿鲸类上得到了证实(Yang 2002; Das, 2003),并且先后分离出相关的化合物 HgSe 微粒(Nigro 和 Leonzio, 1996)和 Hg(S<sub>0.34</sub>, Se<sub>0.66</sub>)晶体(Ng 等 2001)。海洋哺乳动物组织中甲基汞的比率很高,而到成体时降到很低(无机汞的比率相应增高),显示出脱甲基化水平的变化。可能的解释有两个,存在着脱甲基化机制启动的阈值或幼体的脱甲基化能力较低(Das, 2003)。