

重金属镉、铅、铜和镍在非洲鲫鱼 体内的积累、分布和排出*

吴玉霖 赵鸿儒 侯兰英 娄清香

(中国科学院海洋研究所)

海洋生物对重金属有相当强的累积能力,它们对海洋中重金属的分布和迁移过程中起着重要的作用。许多学者在这方面进行了研究,但试验材料主要是无脊椎动物。Wright, Heit 等曾对鱼体中若干重金属含量进行过测定分析。瑞典人首先使用狗鱼 *Esox lucius* 作为河口淡水和半咸水汞污染的指示生物。Dix 等也建议用鲮 *Platycephalus busseus* 作为海洋汞污染的指示生物。然而由于室内饲养困难等原因,对鱼类进行实验室内的试验研究的报道较少,Westernhagn 等曾对镉在鲮 *Limanda limanda* L. 和拟庸鲮 *Pleuronectes platessa* L. 体内的积累、分布和排出进行了试验研究。

本文利用非洲鲫鱼 *Tilapia mossambica* (Peters) 为试验材料,它具有取材易、繁殖快、易饲养等特点,是一种较好的人工养殖对象,用它进行重金属镉、铅、铜和镍在体内积累、组织分布和排出的试验研究,对于了解重金属在海洋生物中的分布和迁移;渔业水质标准的制定等均具有一定的意义。

材料和方法

分别选用体长 2.5—6.8cm, 体重 0.55—4.58g 的鱼(用于对重金属积累和排出的试验)和体长为 8.3—12.8cm, 体重为 9.7—28.48g 的鱼(用于不同组织器官中重金属分布的试验),先在存养池海水中驯养 20 天左右,然后选取健康个体移入实验室内。每个培养用的大圆玻璃缸内加海水 10 升,放养密度是: 小鱼每缸 30 尾,大的每缸 15 尾。海水盐度为 33‰ 左右,水温控制在 25℃。另外做两组水温 20℃ 和 30℃ 的平行试验。养殖海水中四种重金属浓度分别为: Cd, 0.1; Cu, 0.1; Pb, 0.5 和 Ni, 1.0ppm。每天以同样浓度的新鲜海水更换一次。以晒干的淡水溞类为饵料,每天投饵二次。鱼体对重金属的积累试验是: 每隔二星期取样一次,每次取鱼 8 尾进行测定分析,共取 12 次样品,延续时间达 168 天。重金属在鱼体不同组织内分布的测定是: 于试验开始后的第 117 天、123 天和 129 天各取鱼三尾,分别对头部、肌肉、骨骼、肾脏、肝脏、心脏、胆、胃、肠、生殖腺、鳞、鳃和鳔等 13 种组织进行分析。我们以这三次取样共 9 尾鱼的平均值进行分析讨论。鱼体内四种重金属的排出试验是在比上述浓度高一倍的海水中养殖了 56 天之后,把鱼转移到不加重金属的干净海水中,每缸水量亦为 10 升,每天更换以新鲜海水一次,并喂以上述同

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 880 号。本文承娄康后教授和吴宝铃教授审阅,深表谢意。
收稿日期: 1982 年 7 月 20 日。

样的饵料。我们分别于排出试验开始后的第 3, 7, 12, 32, 46 和 66 天取样分析测定, 每次取鱼 6 尾。

每次取样后, 把样品移入凯氏烧瓶中, 加入浓硫酸和浓硝酸在电炉上进行湿法消化, 在样品炭化之后, 补加适量的浓硝酸直至消化完成。冷却后, 用氨水调 pH 值至 4—5。然后定容并加入 1% 的吡咯烷二硫代甲酸铵 (APDC) 和 1% 的二乙基二硫代氨基甲酸钠的混合液对重金属进行络合, 用甲基异丁酮 (MIBK) 萃取。最后取有机相在 WFD-Y₂ 型火焰原子吸收分光光度计上进行测定。

结果和讨论

1. 非洲鲫鱼对镉、铅、铜和镍的积累

试验结果表明, 鱼体对四种重金属都有一定的积累能力, 而且积累的趋势也近似 (见图 1)。在试验开始后的前两个星期内积累速度较快, 除镉外, 其他三种金属的积累量均达到试验期间最高积累量的 50% 左右。随着时间的推移, 鱼体内四种金属的积累量不断增多, 至试验开始后的第 98 天左右, 铜、镉和镍均出现了积累高峰, 此后进入动态平衡状态。铅的积累高峰出现在第 140 天。至试验后期, 积累量有所下降, 铅的下降尤为迅速。从鱼体对金属的最高积累量看, 四种金属之间存在着较大的差异。它们在鱼体内最高积累量分别为: Pb, 14.04; Cu, 7.65; Ni, 1.78 和 Cd, 0.94 mg/kg 湿重, 其间的相对比值为 0.58:0.31:0.07:0.04, 即其大小依次为: Pb > Cu > Ni > Cd。这种顺序也见于对许多软体动物的测定。

为了解温度在非洲鲫鱼对重金属积累上的影响, 我们在 30°C, 25°C 和 20°C 三种温度等级进行了试验。除 30°C 组因恒温控制失调导致生物死亡而未获结果外, 从 25°C 和 20°C 两组的资料对比看来, 温度对镉和镍在鱼体内积累量有些影响, 即 20°C 组略多于 25°C。而在铅和铜的积累上则看不出有什么不同 (见表 1)。

生物浓缩系数 (BCF) 是以每克湿重鱼体所含的重金属微克数与每毫升海水中所含

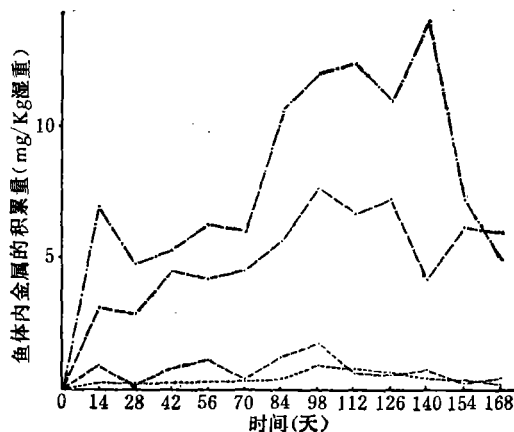


图 1 非洲鲫鱼对镉、铅、铜和镍的积累

Fig. 1 Accumulation of four heavy metals by *Tilapia mossambica*

---Pb ---Cu
 - - - - Ni Cd

的该种重金属微克数的比值表示。它反映了生物对重金属的积累能力。从我们的试验结果看,非洲鲫鱼对铜的生物浓缩系数最高,最大值达到 76.45,其次为铅和镉,分别为 28.08 和 9.37。而镍最低,仅为 1.78。即四种重金属的生物浓缩系数的大小依次为: $Cu > Pb > Cd > Ni$ 。和我们过去单一暴露于镉的试验相比¹⁾,这次试验中非洲鲫鱼对镉的浓缩系数偏低些(见表 2)。其他三种金属对非洲鲫鱼积累镉是否有影响,尚需进一步试验证实。不过,从表中可以看出,浓度在 0.01 至 0.25ppm 范围内,非洲鲫鱼对镉的浓缩系数与海水中镉的浓度无关。换句话说,随着暴露浓度的升高,鱼体内金属的积累量也在增加。

表 1 不同温度条件对非洲鲫鱼积累重金属的影响 (mg/kg 湿重)

Table 1 The effect of different temperatures on the heavy metal concentration in fish

暴露天数	42 天		70 天		98 天	
	25℃	20℃	25℃	20℃	25℃	20℃
镍	0.827	1.237	0.429	1.666	1.779	1.465
镉	0.259	0.451	0.378	0.812	0.937	0.955
铅	5.287	4.104	5.990	11.875	11.999	9.899
铜	4.516	3.948	4.532	5.828	7.645	4.345

表 2 海水中镉的浓度与生物浓缩系数之间的关系

Table 2 The relationship between the bioaccumulation factor and Cadmium concentration in seawater

镉的浓度 (ppm)	0.01	0.05	0.1*	0.25	1.25
最大浓缩系数	18.0	15.0	9.37	15.5	22.6
出现最大浓缩系数时鱼被暴露的天数	132	77	98	79	97

* 为本次试验数据

2. 四种重金属在非洲鲫鱼不同组织中的分布

四种重金属中,铜是生物体维持正常机能所必需的生命元素,镍是一种可能必需的生命元素。然而,当这两种元素达到一定浓度水平时,生活在其环境中的生物就要受其毒害。镉和铅在极低的浓度下对大多数生物都是有毒的。由于四种金属与生物生命活动的关系不同,因而它们在生物体不同组织内的分布也有差异。

(1) 镉在鱼体不同组织中的分布: 从我们对四种重金属在鱼体 13 种组织中含量的测定中可以看出,镉主要分布在肝脏和肾脏,分别达到 3.51 和 4.66mg/kg 湿重。胃和肠中的含量也较高,但其中主要是包含在胃和肠的内含物——食物的残渣和粪便中¹⁾,肌肉和头部含量最低,分别为 0.063 和 0.053mg/kg 湿重(见图 2)。这与 Brooks & Runsey (1974)的报道:镉是累积在硬骨鱼的肝和肾等软器官中是一致的。Westernhagen 等^[8]在用鲾和拟庸鲾的试验中也发现,肝脏中镉的含量最高,而肌肉中的很低。Heit^[6]对捕自 Chesapeake 湾的鲈鱼 (Striped bass) 的分析中指出肝中镉的含量要比肌肉中的高得多。有

1) 崔可铎、赵鸿儒等,1980。非洲鲫鱼 *Tilapia mossambica* 对镉的累积(未刊稿)。

人用捕自澳大利亚东北水域的黑枪鱼 (Black marlin) 进行测定, 也获得了类似的结果。

镉主要积存在肝脏和肾脏中, 这与人体及其他哺乳类动物的实验结果相一致。

(2) 铅在鱼体不同组织中的分布: 铅主要分布在肾脏中, 高达 302.77mg/kg 湿重。其次是心脏和胃肠等, 肌肉中含量最低, 仅为 0.83mg/kg 湿重。与镉和铜在鱼体内分布情况形成鲜明对比的是, 相对地说, 铅在肝脏中的分布较少, 而在骨骼中较多, 这可能因铅的代谢与钙相平行有关, 所以铅可以较多地沉着于骨骼中(见图 3)。

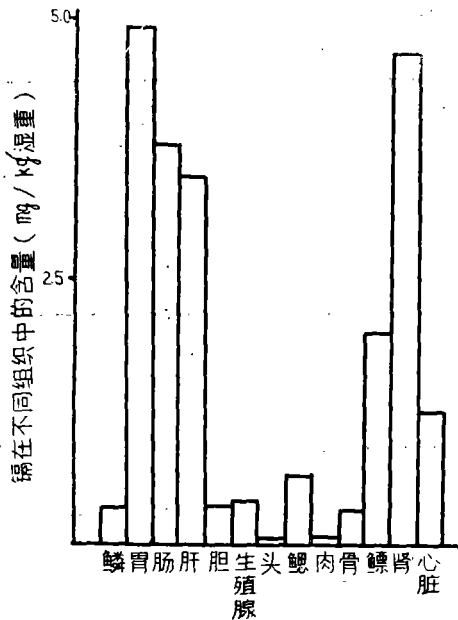


图 2 镉在不同组织中的分布

Fig. 2 Cadmium distribution in tissues

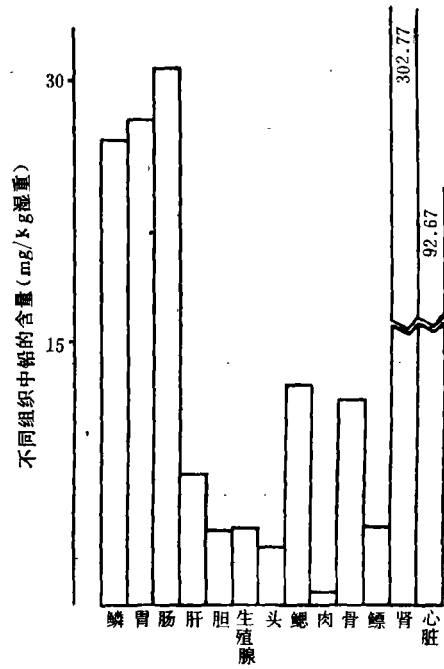


图 3 铅在不同组织中的分布

Fig. 3 Lead distribution in tissues

(3) 铜在鱼体不同组织中的分布: 鱼体内铜相当集中地分布在肝脏内, 高达 79.43 mg/kg 湿重。肝是鱼体中铜的主要“仓库”, 这与在其他生物包括人体的测定中所获得的结果相同。铜是一种重要的生命必需的微量元素, 在对照样品的肝中含量也相当高(达到 72.43mg/kg 湿重), 所以与其他组织相比, 在试验过程中肝脏内铜的实际增加量不是很大(见图 4)。肾和心脏中也有较多量铜的分布。而肌肉中含量最低, 仅为 0.02mg/kg 湿重。铜在鱼体内的这种分布情况同 Brooks & Runsey (1974) 的报道相一致。Heit^[6] 对鲑鱼的测定中也发现肝脏中铜的含量要比在肌肉中的高得多。

(4) 镍在鱼体不同组织中的分布: 鱼体内不同组织中都有镍的分布。以心脏中含量较高, 达到 28.12mg/kg 湿重, 其次为肾脏、胃和肠。肌肉和头部中的较低, 均在 0.49mg/kg 湿重左右(见图 5)。Wright^[9] 发现, 硬骨鱼类的皮、肝和肾中, 镍的浓度比其他器官稍高些。而在我们的试验中, 肝中镍的含量并不高。

综上所述, 四种重金属均主要分布在肾脏、肝脏和消化系统等组织中, 在肌肉中含量最低。

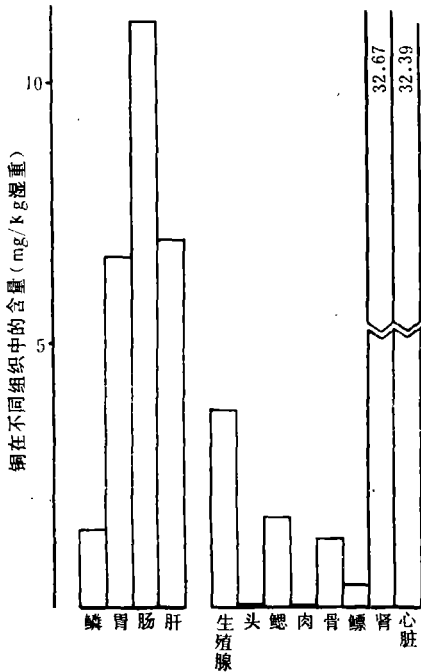


图 4 铜在不同组织中的分布
Fig. 4 Copper distribution in tissues

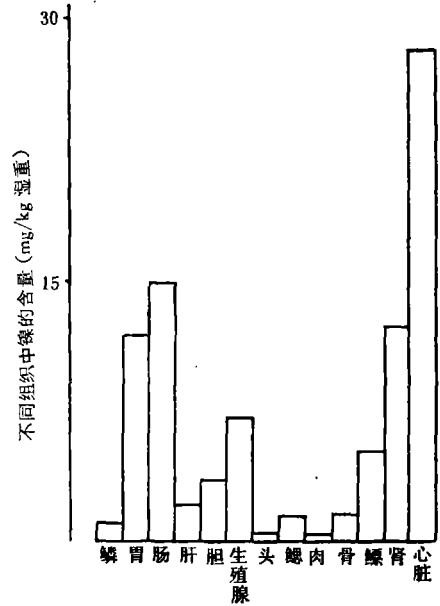


图 5 镍在不同组织中的分布
Fig. 5 Nickel distribution in tissues

3. 非洲鲫鱼体内镉、铅、铜和镍的排出

从试验中可以看出,非洲鲫鱼从暴露状态移入天然海水中后,体内积累的重金属就开始逐渐排出(见图 6)。除铅外,至试验末期(第 66 天左右)其他三种重金属均能大部分被排出体外。总的趋势是: 鱼体内积累量小的金属排出较快,镉和镍在 66 天内均能排出 90% 以上。金属的排出率可用生物学半衰期来表示,金属的生物学半衰期 ($B_{1/2}$) 是指积累到鱼体内的金属残留量,由于生命活动过程的结果而排出一半所需的时间。我们利用

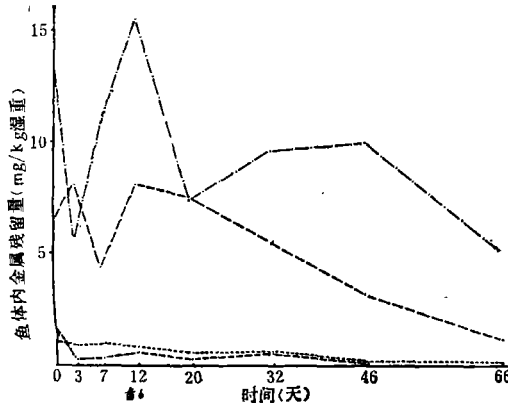


图 6 非洲鲫鱼体内重金属的排出
Fig. 6 Depuration of four heavy metals by *Tilapia mossambica*
- - - - - Pb - · - · - · Cu
····· Ni ······ Cd

Renfro (1973) 提出的方法进行计算(转引自 Cunningham; 1977)^[3]。它是利用最小二乘法直线迴归分析的方法,方程式是: $\log Y = a + bx$

这里 Y 为在时间为零时鱼体内金属的保留量的百分数; a 为 Y 的截距; x 为时间(天)



图 7 肉中重金属的排出

Fig. 7 Depuration of four metals in muscle

—Ni - - - - Pb
- · - · - Cd

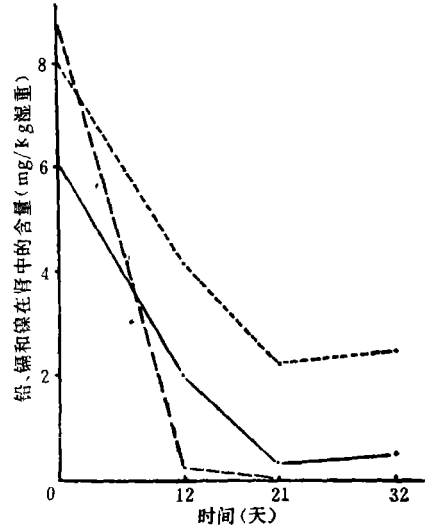


图 8 肠中重金属的排出

Fig. 8 Depuration of four metals in gut

—Ni - - - - Pb
- · - · - Cd

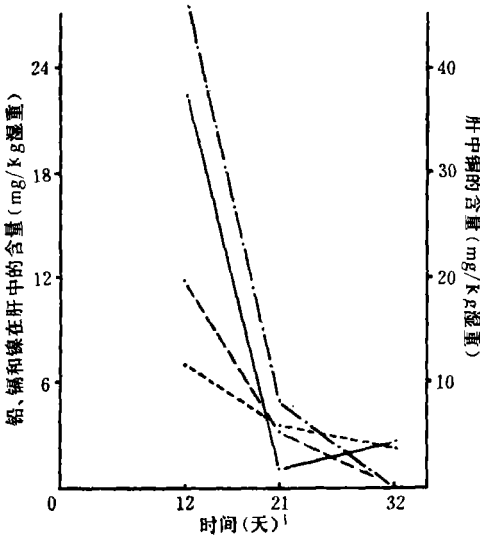


图 9 肝中重金属的排出

Fig. 9 Depuration of four metals in liver

—Ni - · - · - Cu
- - - - Pb - · - · - - Cd

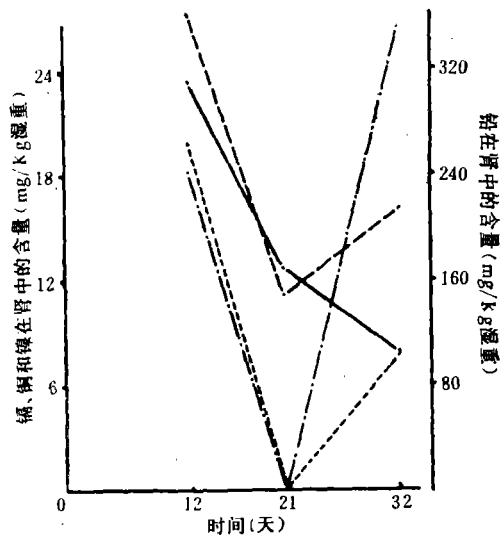


图 10 肾中重金属的排出

Fig. 10 Depuration of four metals in kidney

—Ni - · - · - Cu
- - - - Pb - · - · - - Cd

数); b 为斜率。以下列等式计算生物学半衰期:

$$B \frac{1}{2} = \frac{\log 2}{b}$$

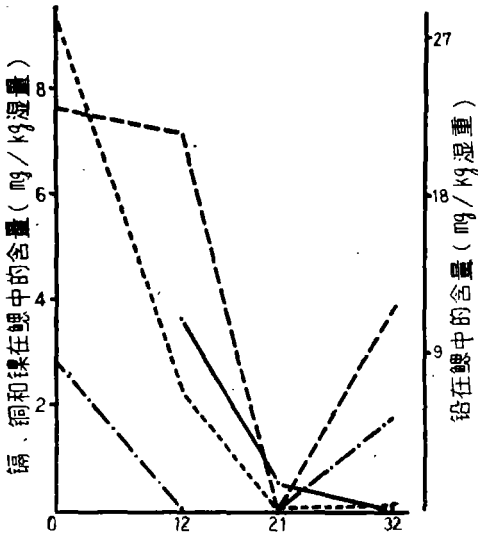


图 11 鳃中重金属的排出

Fig. 11 Depuration of four metals in gill

—Ni - - - - -Cu
- - - - -Pb - - - - -Cd

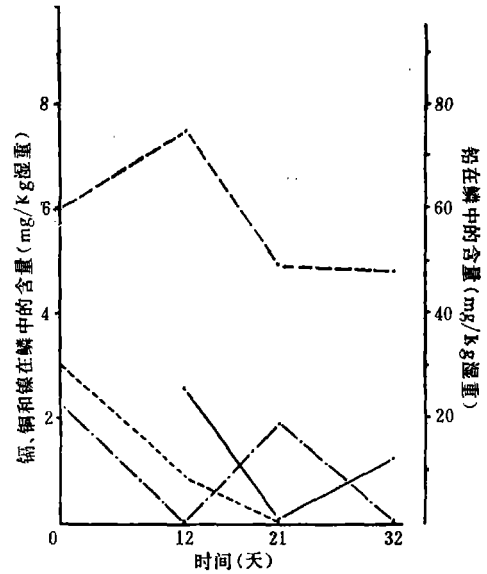


图 12 鳞中重金属的排出

Fig. 12 Depuration of four metals in scale

—Ni - - - - -Cu
- - - - -Pb - - - - -Cd

据计算结果(见表 3)可以看出,以铅的半衰期最长,依次是铜和镉,镍的最短。Pringle 等用牡蛎进行试验,暴露于铅浓度为 0.2ppm 的海水中,49 天之后,进行排出试验,经计算得出其生物学半衰期为 143 天,而 Schulz-Bades (1974) 用紫贻贝试验,铅的浓度为 1.0 ppm,35 天之后进行排出试验,所获得其生物学半衰期为 70.3 天。可以看出,铅排出的速度是较慢的。

鱼体不同组织内重金属的排出,以鳃、鳞及胃肠和肝速度较快,而肌肉和骨骼较慢(见图 7—12)。这和国外一些有关的报道相一致。Westernhagen 等^[8]用鳃进行试验,发现鳃

表 3 非洲鲫鱼对四种重金属生物学半衰期的测定

Table 3 Biological half-life ($B\frac{1}{2}$) determinations for four heavy metals depuration experiments

重金属	暴露期间海水中金属浓度 (ppm)	暴露时间 (天)	开始排出时体内金属残留量 (mg/kg 湿重)	排出时间 (天)	水温 (°C)	$B\frac{1}{2}$ (天)
铜	0.2	56	6.335	66	25	25.9
镉	0.2	56	1.038	66	25	18.9
铅	1.0	56	13.273	66	25	115.5
镍	2.0	56	1.738	66	25	12.3

对镉的排出速度较快,暴露于 $5\mu\text{g Cd/l}$ 的鱼经过 143 天排出之后,就能回到正常的值。但他的试验表明,肝脏中镉的排出相当慢,143 天之后仍超过 2.5ng Cd/mg 湿重。从不同组织中四种重金属排出的总趋势看,镍和镉较快,铜和铅较慢。

综上所述,可以看出:非洲鲫鱼对四种重金属均有一定的积累能力,但以铅的积累量最高,依次为铜、镍和镉。至试验开始后的第 98 天左右,对四种金属的积累均出现高峰,此后在一定范围内波动,即达到动态平衡状态。在 $0.01\text{--}0.25\text{ppm}$ 浓度范围内,非洲鲫鱼对镉的生物浓缩系数与该元素在海水中的浓度无关。从金属在鱼体内的分布上看,四种重金属主要分布在肾脏、肝和消化系统内,肌肉中含量最低。积累在非洲鲫鱼体内的金属能被较快地排出体外,除铅外,其他三种金属在一个月内均能排出 50% 以上。

参 考 文 献

- [1] 崔可铎、吴玉霖、刘玉梅等,1982。非洲鲫鱼 *Tilapia mossambica* 对汞积累的实验研究。环境科学学报 2(1): 80—84。
- [2] 吴玉霖、崔可铎、刘玉梅等,1983。毛蚶对汞积累和排出的室内实验。海洋与湖沼 14 (1): 30—34。
- [3] Cunningham, P. A., 1979. The use of bivalve molluscs in heavy metal pollution research. (In: 'marine pollution: functional responses'. Edited by Verberg, W. B. et al.) Academic Press. New York. pp. 183—221.
- [4] Eisler, R., 1974. Radiocadmium exchange with seawater by *Fundulus heteroclitus* (L). (Pisces: Cyprinodontidae). *J. Fish Biol.* 6: 601—612.
- [5] Förstener, U., 1979. Metal pollution in the aquatic environment. Berlin, Heidelberg, New York. Springer-verlag. pp. 82—89.
- [6] Heit, M., 1979. Variability of the concentrations of seventeen trace elements in the muscle and liver of a single striped bass, *Morone saxatilis*. *Bull Environ. Contam. Toxicology* 23(1/2): 1—5.
- [7] Phillips, D. J. H., 1977. The use of biological indicator organisms to monitor trace metal pollution in marine and estuarine environments—a review. *Environ. pollut.* 13(4): 281—317.
- [8] Westernhagen, H. Von., 1980. Correlation between Cadmium concentration in the water and tissue residue levels in dab, *Limanda limanda* L., and plaice, *Pleuronectes platessa* L. *J. Mar. Biol. Ass. U. K.* 60: 45—58.
- [9] Wright, D. A., 1976. Heavy metals in animals from the north east coast. *Mar. Pollut. Bull.* 7(2): 36—38.

ACCUMULATION, TISSUE DISTRIBUTION AND DEPURATION OF Cd, Pb, Cu, Ni BY *TILAPIA MOSSAMBICA**

Wu Yulin Zhao Hongru Hou Lanying and Lou Qingxiang

(*Institute of Oceanology, Academia Sinica*)

ABSTRACT

Tilapia mossambica were held in seawater containing Cd, Pb, Cu, Ni in the concentrations of 0.1, 0.5, 0.1 and 1.0 ppm respectively. The salinity of seawater was about 33 ‰, temperature 25° C. The metal concentration of fish body and tissue was determined by wet digestion and flame atomic absorption spectrophotometry. For the first 98 days, the metal concentration increased with time. Then it fluctuated within a steady range during the succeeding month or so. The largest bioaccumulation factors were: Cu, 76.45; Pb, 28.08; Cd, 9.37 and Ni, 1.78 respectively. Near the end of the experiment concentration slightly declined. It was also found that, within the Cadmium concentration range of 0.01—0.25 ppm, there existed no relationship between the bioaccumulation factor and Cadmium concentration in seawater.

The experiment showed that kidney, liver and digestive system were the principal tissues of heavy metal accumulation. Muscle was an insignificant metal accumulator.

In the depuration experiment, we removed the fish held for 56 days in seawater containing heavy metals at the concentration of Cd, 0.2; Cu, 0.2; Pb, 1.0 and Ni, 2.0 ppm respectively to seawater with no heavy metal added. It was found that all the four metals could be depurated, but depuration was more rapid for Ni, Cd and Cu than for Pb. Their biological half-lives were: 12.3 days for Ni, 18.9 days for Cd, 25.9 days for Cu, 115.5 days for Pb.