

763-766

第19卷第5期  
1999年9月生态学报  
ACTA ECOLOGICA SINICAVol. 19, No. 5  
Sept., 1999

## 鱼体(去鳃)和鱼鳃对不同形态铜的积累特征

梁涛<sup>1</sup>, 陶澍<sup>1</sup>, 林健枝<sup>2</sup>

Q959.408

(1. 北京大学城市与环境学系, 北京, 100871; 2. 香港中文大学地理系, 香港, 新界, 沙田)

**摘要:** 在实验室条件下研究实验鱼 *Paracheirodon* 对人工河水中不同形态铜的积累特征, 对比了鱼体(去鳃)和鱼鳃对铜吸收量的差异, 并探讨了鱼对铜的吸收机理。研究表明, 实验鱼鳃部和体内铜积累量均随水相游离铜浓度增高、暴露时间增长而增加, 但鳃部积累浓度较鱼体其余部分高一个数量级, 其从水相富集铜的速率显著高于鱼体。相比之下, 经摄食获取的铜首先积累在鱼体内(非鳃部)。天然水中富里酸的存在明显降低了铜对鱼的有效性。

**关键词:** 鱼鳃; 鱼体; 铜; 形态; 积累; 生物有效性

## Accumulation of copper in the fish body with gill removed and the fish gill

LIANG Tao<sup>1</sup>, TAO Shu<sup>1</sup>, LAM Kin-Che<sup>2</sup> (1. *Urban and Environmental Science Department of Peking University, Beijing 100871*; 2. *Geography Department of Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, N. T., Shatin*)

**Abstract:** The accumulation and absorption kinetics of copper by the fish body with gill removed and the fish gill from both water and food were tested in laboratory conditions. The effects of copper concentration in the water and food, and the existence of fulvic acid on the absorption were investigated. It was demonstrated that the amount of copper accumulated in both fish body and gill increased with the increase in copper concentration in water and food, and exposure duration up to a level above which the normal physiological activity of fish was inhibited. With fulvic in the system, the absorption rate decreased significantly, indicating that the fulvic combined copper is not available to the fish uptake.

**Key words:** *Paracheirodon*; gill; copper; speciation; accumulation; bioavailability

文章编号: 1000-0933(1999)05-0763-04 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

当环境科学家认识到重金属对生物的毒性不仅与其总量有关, 更取决于其形态分布时, 重金属形态以及生物有效性研究便成为环境生物地球化学及环境生物学的新热点, 迄今为止, 这方面的工作主要集中于形态和吸收机理两个方面。其中形态研究着眼于形态分析方法、吸附与络合模型以及化学平衡计算<sup>[1,2]</sup>, 而吸收机理研究包括重金属进入表皮细胞的途径<sup>[3]</sup>、生物毒性实验<sup>[4]</sup>、生物膜的穿透机理模型<sup>[5]</sup>及重金属毒性影响因素<sup>[6]</sup>等。

以往的研究指出, 鱼类对重金属的吸收主要通过鱼鳃、体表以及进食 3 条途径, 重金属则以溶解态和颗粒态方式被摄入<sup>[7]</sup>。早期的毒性实验表明, 重金属是以被动输送方式沿水到鱼体内的浓度梯度进入鱼体的<sup>[7]</sup>, 但近来的研究则对此提出了异议<sup>[8]</sup>, 至今为止, 这一吸收机理尚未完全查明<sup>[9]</sup>。

除继续探索可操作的形态分析手段, 并深入进行吸收机理研究外, 综合进行鱼体吸收重金属机理与金属形态研究, 不仅可将传统的化学形态概念直接与生物有效性联系起来, 而且有可能为生物吸收机理研究提供有效手段。这方面的初步研究结果已证实鱼体对游离态铜的专性吸收以及天然配位体对铜生物活性的抑制能力<sup>[10,11]</sup>。本研究通过室内实验对比鱼体(去鳃)和鱼鳃对不同形态铜的吸收特点, 并据此探讨鱼类吸收重金属的机理。

基金项目: 国家杰出青年基金[49525102]及国家自然科学基金[49271063]资助项目

收稿日期: 1997-04-17, 修订日期: 1997-09-20

## 1 材料和方法

本试验选用彩虹方头鱼 *Paracheirodon*。经过筛选和短期驯养,选择出一批存活率高的成鱼(体长 3~4cm)为被试对象。

为模拟鱼的天然生存环境,又不至于引入过多干扰因素,试验用水选用以蒸馏水为底液配置的人工河水。人工河水的成分参考了我国主要河流的平均离子含量配置,其常量离子含量参见表 1。

表 1 试验用水中常量离子含量表(mg/L)  
Table 1 The contents of metals in test water(mg/L)

| Ca <sup>2+</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Cl <sup>-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> |
|------------------|-----------------|----------------|------------------|-----------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 64.9             | 30.8            | 13.6           | 15.5             | 115.2           | 103.0                         | 4.8                          | 58.4                          |

本研究设计了 4 组实验,在实验室室温(25℃)条件下,分别探讨吸收量随时间变化、随浓度变化、富里酸对吸收的影响以及经食物摄入过程。为了减少由个体差异带来的干扰,各组实验的不同水平均包括 4 条平行用鱼。具体实验设计方案列于表 2。

表 2 各系列实验方案  
Table 2 The plans of all series of experiments

| 实验系列<br>Series                     | 实验设计<br>Experiment design   |
|------------------------------------|---|
| 时间系列<br>Time series                | 铜离子浓度:1mg/L;共 7 个时间水平。<br>时间长度(d):0d、0.5d、1d、3d、6d、12d、24d                    |
| 浓度系列<br>Conc. series               | 时间长度:5 周;换水频率:1 次/周;共 6 个浓度水平。<br>铜离子浓度(mg/L):0、0.32、0.64、0.96、1.28、1.96      |
| 富里酸系列<br>Adding fulvic acid series | 时间长度:5 周;换水频率:1 次/周;铜离子浓度:0.64mg/L;共 5 个富里酸加量水平。<br>富里酸投放量(ml):0、1、2、3、4      |
| 喂食铜系列<br>Feeding series            | 时间长度:25d;换水与喂食频率:1 次/5d,2mg/次;共 5 个铜浓度水平<br>饲料中投放铜量(mg/kg):0、2.5、5.0、7.5、10.0 |

上述各组实验的测定项目均为鱼鳃和鱼体(去鳃)中铜的含量,样品处理步骤如下:

(1)将试验用鱼(每组 4 条)置于表面皿上在-15℃冷冻 20min,然后将鱼鳃从鱼体中完全取出。

(2)将鱼体(去鳃)和鱼鳃(4 条 1 组)分别在 105℃条件下烘干并称重。

(3)在盛放样品的烧杯中加入 10ml 高纯浓 HNO<sub>3</sub> 封盖过夜。次日,在可调温度电炉上加热,残渣溶解后继续加热至溶液呈棕黄色,加入浓 HClO<sub>4</sub> 1 ml 和数滴浓 HNO<sub>3</sub>,缓慢加热至近干,滴入数滴浓 HNO<sub>3</sub> 和浓 HClO<sub>4</sub> 至溶液无色透明,再加热至烧杯底部剩下白色或淡黄色物质,即消解完毕。消解后的样品加入少量高纯去离子水,调 pH 至中性后定容待测。

样品铜离子浓度用阳极溶出伏安法在配有 303 悬汞电极的 PAR-384 多功能极谱仪上测定。测定条件为曝气时间,180s;富集时间,120s;平衡时间,30s;扫描范围,-0.500V~+0.100V;扫描速度,4mV/s。

本试验所用玻璃器皿均在 10% HNO<sub>3</sub> 中浸泡 24h 以上,再用去离子水漂净;除人工河水储备液用去离子水和化学纯试剂配制外,其他所有试剂用高纯去离子水和优级纯试剂配制。试验用河水富里酸采自黑龙江(XAD 树脂柱富集),经脱盐处理后使用。

## 2 结果与讨论

### 2.1 铜在鱼体(去鳃)和鱼鳃中的积累

本研究第 1 组实验比较了不同浓度条件下鱼体(去鳃)和鱼鳃中铜的积累量。为期 5 周的实验结果如

图 1 所示。

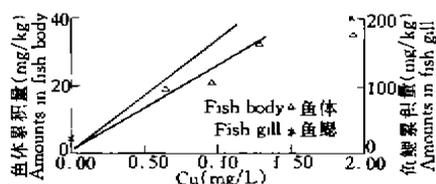


图 1 水相游离铜浓度对鱼体(去鳃)和鱼鳃铜积累量的影响

Fig. 1 Effects of the copper concentration to the accumulation of fish gill and fish body

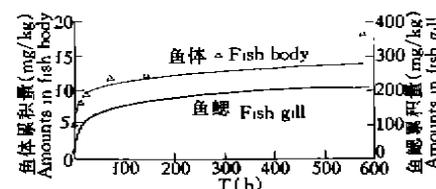


图 2 鱼体(去鳃)和鱼鳃对游离态铜的吸收过程

Fig. 2 The absorption process of fish body and fish gill to copper

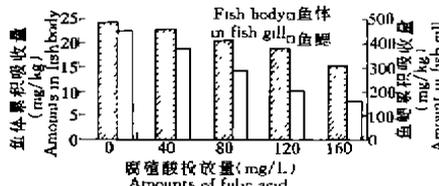


图 3 富里酸对鱼体(去鳃)和鱼鳃吸收铜的影响

Fig. 3 Effects of fulvic acid to fish body and fish gill

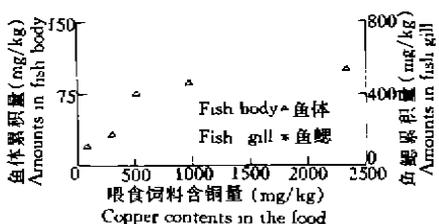


图 4 经饵料摄入铜在鱼体(去鳃)和鱼鳃中的积累

Fig. 4 Accumulation through food in fish body and fish gill

由图 1 可以看出,在铜浓度较低时(约 1mg/L 以下),鱼体(去鳃)和鱼鳃对铜的吸收大体表现为一级动力学过程,即吸收量与水相游离态铜浓度成正比,随着铜浓度不断升高,吸收量的增幅呈明显下降趋势。根据预备性研究结果,在本实验条件下,实验鱼的急性中毒浓度为 2~3mg/L。显然,当水相铜浓度超过 1mg/L 时,鱼体正常生理活动受到影响,导致鱼体和鱼鳃对铜的吸收量减少。

在为期 600h 的吸收实验中,鱼体(去鳃)和鱼鳃对于 1mg/L 游离态铜的吸收过程如图 2 所示。

如图 2 所示,虽然鱼鳃中铜积累量较鱼体(去鳃)高一个数量级以上,铜在鱼体(去鳃)和鱼鳃中的积累趋势十分相似,即积累量增加速率随时间增加而不断下降。造成这一动力学特征的原因可能包括:①铜在鱼体中的积累过程在某种程度上抑制了鱼体正常的生理活动;②长时间饥饿状态影响鱼体的吸收机能;③铜在鱼体和鱼鳃中的积累趋向平衡。在本项研究实验中,上述 3 种原因可能同时起作用。

### 2.2 富里酸对水中铜有效性的影响

在同一总铜浓度条件下,体系中存在的富里酸显然会影响铜的存在形态,从而影响其生物有效性。图 3 所示实验结果证明了这种影响。

有关研究证明,富里酸对铜的络合作用降低了铜对藻类<sup>[10]</sup>和鱼体<sup>[11]</sup>的有效性。本项研究的结果证明,富里酸的存在明显降低了鱼鳃和鱼体对铜的吸收。鱼鳃中铜的积累主要通过呼吸作用,富里酸络合作用显然不利于铜进入鳃部。鱼体中铜的积累既可能来自体表直接吸收,也可能来自血液输送(经鳃部),富里酸的存在显然降低了鱼体中铜的积累速率。由此可见,无论哪种吸收机理居主导地位,水生富里酸与铜的络合作用都会降低溶解态铜的生物有效性。

### 2.3 鱼鳃和体表对喂食铜的摄入

图 4 显示了用不同浓度喂食铜进行的实验结果。其中喂食饲料的制备是通过于鱼虫加入不同浓度的铜溶液静置过夜再过滤风干得到的。

喂食实验结果证实鱼类不仅可以通鳃和体表吸收水相游离态铜,也可以经进食摄入固态铜。从图 4 可以看出,在为期 25d 的实验中,鱼体对铜的富集量随饲料含铜量的增加而增加。当饲料含铜浓度超过 500mg/kg 时,其积累速率明显下降并趋于平缓,说明铜的积累量已达到影响鱼正常生理活动的水平或者对

1

铜的吸收已接近平衡。虽然本实验中没有直接向水相中加铜,但饵料中铜的溶出是不可避免的,鱼鳃中积累的铜可能部分来自对这些铜的直接吸收,同时不排除经饵料摄入的铜在鱼体内再分配所致。

#### 2.4 鱼体(去鳃)和鱼鳃吸收铜的关系

鱼体和鱼鳃都可以直接吸收水相中的游离态铜,被摄入的铜也可以在体内通过血液循环进行迁移和再分配。在恒定水相铜浓度(1mg/L)条件下鱼鳃和鱼体(去鳃)铜富集量比值的时间变化如图5所示。

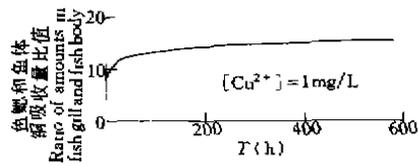


图5 同一浓度下鱼体(去鳃)和鱼鳃铜积累比的时间变化

Fig. 5 The variations of ratios of accumulation amounts in fish gill and fish body under the same concentration

从图中的曲线可以看出,鱼鳃的积累量显著高于鱼体(去鳃),且有不断上升趋势,这说明鱼鳃对铜的吸收是鱼富集液相铜的主要方式。另一方面,鳃/体积累比的上升幅度却不断下降,在400h后渐趋平缓,很可能反映了铜沿鱼鳃和鱼体间浓度梯度所发生的迁移。因为此时鱼体的正常生理活动可能已受到影响或鱼体对铜的吸收量已接近平衡,铜摄入速率开始趋向平缓,而鱼鳃和鱼体(去鳃)间的浓度梯度仍在增加,由鱼鳃向鱼体的铜迁移量开始影响鱼鳃和鱼体(去鳃)中铜积累量的比率,导致其比值增幅越来越小。

#### 3 结论

实验鱼鳃部和体内铜积累量均随水相游离铜浓度增高、暴露时间增长而增加,但鳃部积累浓度较鱼体其余部分高一个数量级,其从水相富集铜的速率显著高于鱼体。相比之下,经摄食获取的铜首先积累在鱼体内(非鳃部)。天然水中富里酸的存在明显降低了铜对鱼的有效性。

#### 参考文献:

- [1] Florence R W. *Anal. Chem. Acta*, 1983, 281(1): 151.
- [2] Tao S, Chen J and Tang F. *Environ. Tech. Let.* 1987, 8(1): 151.
- [3] Rainbow P S. 海洋生物对重金属的积累和意义, *海洋环境科学*, 1992, 11(1): 44~52.
- [4] George S G. *Heavy metals in the marine environment*. CRC press, 1990: 123~135.
- [5] 胡西城,等. 生物浓缩的机理与模型, *环境科学丛刊*, 1989, 10(4): 14~23.
- [6] Jerry L H, et al. *Bioavailability: physical, chemical and biological interactions*. CRC press, 1994: 39~45.
- [7] Pentreath R J, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 1973, 12(1): 1.
- [8] Verbost P M, et al. *J. Exp. Biol.* 1989, 145(1): 185.
- [9] Spry D J and Wood C M. *Can J. Fish. Aquat. Sci.*, 1988, 45(9): 2206.
- [10] 王静,陶澍. 铜与腐殖酸对小球藻生长影响的研究. *生态学报*, 1992, 12(3): 201~205.
- [11] 陶澍,梁涛,刘晓航,等. 树脂-半透膜囊与鱼体对有效态铜吸附的比较研究. *生态学报*, 1998, 18(2): 223~224.