

Zn 和 I 在鲮鱼体内的积累与分布^{*}

谢瑞文¹, 吴恩应², 肖周业², 钟创光²
(1. 广州市番禺区环境科学研究所, 广东 广州 511400;
2. 中山大学生命科学学院, 广东 广州 510275)

摘 要: 用同位素示踪的方法研究水中的 Zn^{2+} 和 I^- 在鲮鱼体内的积累和排泄行为。结果表明, 在 Zn^{2+} 质量浓度为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, I^- 质量浓度为 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的水体中, Zn 和 I^- 在鲮鱼中的积累趋势大致相同, 并可分别用模拟方程 $Y = 30.729 \ln(t) + 45.983$ 及 $Y = 1.2743 \ln(t) + 2.0991$ 表达。 Zn^{2+} 和 I^- 在鲮鱼体内主要分布在内脏, 7 d 时 Zn 为 $235.48 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, I^- 为 $0.49 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 其次为鳞片和鳃, 肌肉中分布最少。而鱼体对 Zn^{2+} 积累能力较 I^- 强, 对 Zn^{2+} 的浓集系数是对 I^- 的 17.5 倍。 Zn^{2+} 和 I^- 从鲮鱼中的排泄较迅速, 排泄过程可分为快排泄相 (0~1 d) 和慢排泄相 (1~13 d), 其慢相排泄过程可分别用模拟方程 $Y = 6.5688e^{-0.081t}$ 和 $Y = 0.0388e^{-0.1201t}$ 表示。 Zn^{2+} 的慢相半衰期为 8.5 d, I^- 的慢相半衰期为 5.8 d。内脏对于 Zn^{2+} 和 I^- 的排泄速度比其他取样部位快。

关键词: Zn^{2+} ; I^- ; 鲮鱼 *Cirrhina molitorella*; 积累; 排泄; 分布; 同位素示踪

中图分类号: Q691, T503 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2005) S2-0224-05

锌是一种较为常见的重金属, 它既是一种环境的污染物, 也是所有有机体必需的微量元素之一。锌有重要的生理功能和营养作用, 锌缺乏可以导致胚胎发育不良, 儿童发育迟缓, 智力低下, 免疫机能、代谢机能发生紊乱^[1-3]。碘也是动物体不可缺少的一种营养素, 当摄入不足时, 机体会出现一系列的障碍, 对机体免疫功能和儿童智力发展也有一定的影响, 甚至会阻碍大脑发育^[4,5]。部分的水生植物和动物可以积累锌和碘, 如海藻、鱼类。因此对于它们在动物体内的积累与分布情况的研究可为锌污染的防治与锌、碘营养的补充提供有益的指导作用。鲮鱼 *Cirrhina molitorella* 属鲤科_{鲮亚科}鲮属, 是一种亚热带底栖鱼类, 食性广而杂, 是我国南方主要淡水养殖品种之一。本文采用同位素示踪法研究 Zn 和 I 在鲮鱼体内的积累、分布及排泄, 为环境标准的制定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

鲮鱼 *Cirrhina molitorella* 购自广州农贸市场, 平均体质量约 1 g, 养于实验室的大水族箱中。随机挑选 50 尾健康的个体用于实验。

ZnCl_2 : 广州市番禺力强化工厂产品, 分析纯。
示踪剂: $^{65}\text{ZnCl}_2$ 购自中国科学院北京原子能研

究所; Na^{125}I 为美国 NEN 产品, 实验前配成工作液, 实验时各加适量的工作液。

NaI (TI) 多道 γ -谱仪。

1.2 方法

在 $50 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 的玻璃水族箱中注入 20 L (25°C) 水, 加入 $^{65}\text{ZnCl}_2$ 和 Na^{125}I , 以及一定量的 ZnCl_2 和 NaI 工作液, 搅拌均匀, 使水中的 Zn^{2+} 的质量浓度为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, I^- 的质量浓度为 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。每 2~3 d 换一次放射性水, 以维持水中 Zn 和 I 质量浓度不变。

把 50 尾鲮鱼放入水族箱中喂养, 分别于 5 h、1 d、2 d、3 d、4 d、6 d、7 d、8 d 取样: 先取水样测放射性活度; 每次随机取 10 尾鱼活体称量、测整体的放射性活度; 并于 4 d、7 d 在活体测量结束后的个体中随机取 4 条鱼进行解剖, 取鳃、鳞片、内脏、尾鳍、眼球及剩余部分 (肌肉) 分别称重并测放射性活度, 观察 Zn 和 I 在鱼体内各器官的积累和分布情况。

在积累实验结束后, 将剩余的鱼转入自动溢流的玻璃水族箱, 进入排泄实验。分别于 0、2、3、6、8、12 d 取样, 每次取全体作活体称量、测放射性活度; 从 4 d 起隔一定时间取 5 尾鱼进行解剖, 并取鳃、鳞片、内脏、尾鳍、眼球及剩余部分分别称重并测放射性活度, 观察 Zn 和 I 在鱼体内各器

* 收稿日期: 2005-08-02

基金项目: 农业部渔业生态环境重点开放实验室开放基金资助项目 (2003-6)

作者简介: 谢瑞文 (1962 年生), 男, 工程师; E-mail: xienw@21cn.com

官的分布情况。

实验数据以平均值加 SEM 的形式, 使用 SPSS 12.0 进行统计分析。

2 实验结果

2.1 Zn 和 I 在鲮鱼中的积累

鱼体对 Zn 积累的浓集系数 (CF) 在 1 d 为 28.15, 2 d 为 65.65, 从 2 d 起增加较为缓慢, 至 8 d 达 86.02, 比 2 d 增加了 20.37, 即仅增加了 31%。Zn 的积累过程可以用模拟方程 $Y=30.729\ln(t)+45.983$ 表示, 相关系数 $R^2=0.8804$, 其中 t 为时间 (天), Y 为 CF。(图 1)

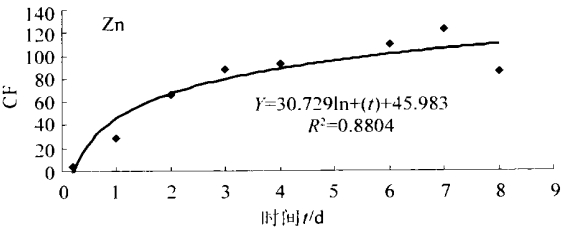


图 1 锌在鲮鱼体内的积累

Fig. 1 Accumulation of Zinc in *Cirrhina molitorella*

鱼体对 I 积累的 CF 在 1d 为 1.32, 2 d 为 3.31, 从 2 d 起基本上于曲线水平变化; 直至 8 d 达 4.92, 比 2 d 时增加了 1.61, 即增加了 49%; 8 d 后仍有较缓的上升趋势。积累过程可用模拟方程 $Y=1.2743\ln(t)+2.0991$ 表示, 相关系数 $R^2=0.9151$ (图 2)。

从图 1 和图 2 可以看出, Zn 和 I 的积累趋势大致相同。然而 8 d 时鱼体对 Zn 的 CF 是 86.02, 对于 I 的 CF 为 4.92, 前者是后者的 17.5 倍。

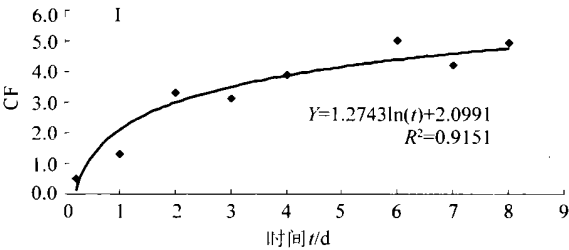


图 2 碘在鲮鱼体内的积累

Fig. 2 Accumulation of iodate in *Cirrhina molitorella*

从表 1 可知, 积累过程中鱼体内 Zn 和 I 的质量分数不断增加。Zn 在 1 d 时质量分数为 $4.494 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 到 8 d 为 $12.344 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; 而 I 在 1d 质量分数为 $0.026 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 到 8 d 则为 $0.096 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。另一方面, 在 8 d 时 Zn 积累的质量分数是 I 的 128.6

倍, 可见鱼体内 Zn 的积累量大大超过 I。

表 1 积累实验过程中鱼体内 Zn 和 I 的质量分数的变化

Tab 1 Concentration of zinc and iodine in <i>Cirrhina molitorella</i> during uptake experiment $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$				
时间/d	0.21	1	2	3
Zn	0.88 ± 0.25	4.49 ± 1.38	9.79 ± 1.56	13.35 ± 2.15
I	0.01 ± 0.00	0.03 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.06 ± 0.01
时间/d	4	6	7	8
Zn	13.12 ± 3.23	15.76 ± 2.20	17.49 ± 2.56	12.34 ± 2.98
I	0.08 ± 0.02	0.10 ± 0.02	0.08 ± 0.01	0.10 ± 0.02

2.1.2 Zn 和 I 的分布 由表 2 可知, 3~7 d 间 Zn 在内脏的质量分数一直在增加; 除内脏外, 在鳞片和尾鳍中的质量分数也有所升高, 而在其他器官中的质量分数则下降。7 d 时 Zn 在各器官的质量分数为内脏团>尾鳍>鳃>鳞片>剩余部分>眼球, 其中在内脏团的质量分数度达 $235.48 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 是在剩余部分中的 67.1 倍, 同时也比在其他器官中的质量分数高。

3~7 d 间 I 在内脏的质量分数也一直在增加, 然而在其他器官中则下降了。7 d 时 I 的分布为内脏团>尾鳍>鳞片>眼球>鳃>剩余部分, 而内脏积累达 $0.49 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 是剩余部分的 12.3 倍。即除内脏外, 其他器官 I 的分布较少。

表 2 积累实验过程中 Zn 和 I 在鲮鱼各器官中的分布

Tab 2 Distributions zinc of and iodine in organs of <i>Cirrhina molitorella</i> during uptake experiment $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$			
项目	器官	时间/d	
		3	7
Zn	鳃	5.69 ± 2.19	4.76 ± 0.73
	鳞片	3.72 ± 0.86	4.44 ± 1.09
	内脏	207.07 ± 77.05	235.48 ± 36.46
	尾鳍	6.68 ± 2.18	8.53 ± 1.66
	眼球	6.36 ± 5.14	3.12 ± 0.65
	剩余部分	4.58 ± 1.27	3.51 ± 0.44
I	鳃	0.06 ± 0.01	0.04 ± 0.01
	鳞片	0.11 ± 0.06	0.07 ± 0.02
	内脏	0.43 ± 0.17	0.49 ± 0.07
	尾鳍	0.17 ± 0.07	0.11 ± 0.02
	眼球	0.06 ± 0.01	0.06 ± 0.01
	剩余部分	0.03 ± 0.01	0.04 ± 0.01

2.2 Zn 和 I 从鲮鱼体内的排泄

鱼体对 Zn 和 I 的排泄趋势大致相同, 而残留率则 I 降低较 Zn 快。排泄过程都可分为快相和慢相, 快相出现在排泄实验的 1 d, 其后进入慢相排泄。经过 1 d, Zn 排出了 40.88%, I 则排出了

49.15%；经过 13 d 则 Zn 排出了 77.29%，I 排出了 87.97%（图 3）。从以上比较可知，I 的排泄速度比 Zn 快。

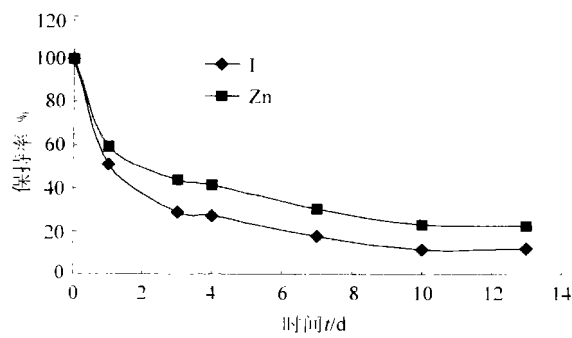


图 3 锌和碘在鲢鱼体内的排泄

Fig. 3 Elimination of zinc and iodine from *Cirrhina molitorea*

在 1~13 d 间 Zn 和 I 的排泄转为慢相，其排泄过程可分别用模拟方程 $Y = 6.5688e^{-0.081t}$ 和 $Y = 0.0388e^{-0.1201t}$ 表示。其中 I 的慢相半衰期为 5.8 d，比 Zn 的慢相半衰期短。（表 3）

表 3 Zn 和 I 在鲢鱼中的排泄

Tah 3 Elimination of zinc and iodine from *Cirrhina molitorea*

项目	排泄方程	相关系数（慢相排泄）	半衰期/d
Zn	$Y = 6.5688e^{-0.081t}$	$r = 0.9412$	8.6
I	$Y = 0.0388e^{-0.1201t}$	$r = 0.8997$	5.8

从表 4 可知，内脏中 Zn 的质量分数，从 4 d 的 $66.16 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 降低至 12 d 的 $8.61 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ；与内脏的情况相似，除鳞片外其他器官中 Zn 质量分数都下降；而鳞片中 Zn 质量分数则一直上升，12 d 时为 $11.42 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ，比 4 d 时增加了 0.67 倍。经过 12 d 排泄，Zn 的分布为尾鳍>鳞片>眼球>内脏>鳃>剩余部分。

内脏中的 I 的质量分数从 4 d 的 $0.20 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 降至 12 d 的 $0.06 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ；各器官 I 的质量分数变化从 4~7 d 与 7~12 d 总的趋势是先下降，后上升，到实验末期与原来相比各器官中质量分数有升有降。而 I 在鳞片中于排泄实验 12 d 时积累达 $0.21 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ，比 4 d 时增加了 2 倍，且其质量分数在排泄过程都一直在增加，和其他器官有所不同。经过 12 d 排泄，I 在各部分的分布为鳞片>尾鳍>内脏>眼球>鳃>剩余部分。

可以看出，内脏对于 Zn 和 I 的排泄速度比其他取样部位快。

表 4 排泄实验过程中 Zn 和 I 在鲢鱼各器官中的分布

Tah 4 Elimination of zinc and iodine from *Cirrhina*

		时间/d		
		$\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$		
项目	器官	4	7	12
Zn	鳃	5.67 ± 1.36	3.84 ± 0.94	4.54 ± 1.14
	鳞片	6.85 ± 1.98	10.12 ± 5.06	11.42 ± 4.72
	内脏	66.16 ± 9.81	16.30 ± 7.45	8.61 ± 1.57
	尾鳍	18.26 ± 4.71	19.96 ± 4.41	16.11 ± 3.69
	眼球	12.16 ± 2.09	16.01 ± 2.74	10.69 ± 1.19
	剩余部分	3.39 ± 0.41	4.11 ± 0.18	3.22 ± 0.43
I	鳃	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.04 ± 0.02
	鳞片	0.07 ± 0.01	0.05 ± 0.02	0.21 ± 0.06
	内脏	0.20 ± 0.03	0.05 ± 0.02	0.06 ± 0.02
	尾鳍	0.28 ± 0.08	0.10 ± 0.10	0.17 ± 0.04
	眼球	0.04 ± 0.01	0.02 ± 0.02	0.05 ± 0.01
	剩余部分	0.02 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00

3 讨论

锌和碘都是动物生命活动中必需的微量元素，由于二者的生理功能不同，因而需要量也不同。碘主要存在于甲状腺中，参与甲状腺素的合成，促进垂体和生殖腺的正常机能，调节营养物质代谢过程。成人体内含碘总量为 20~50 mg，其中 20% 存在于甲状腺中；人体内锌含量为 1.4~2.3 g，广泛分布于各组织器官中^[6]。由上可知，动物对 Zn 的需要量比 I 大，因而要求对 Zn 的积累能力也较后者大。本文积累实验 8 d 时 Zn 的浓集系数是 I 的 17.5 倍，可见鲢鱼对水中的 Zn 的积累能力比对 I 的积累能力强。故实验结果中 Zn 的浓集系数比 I 的大，是由鱼体对这两种元素的不同需要量决定的。

至于鱼体对元素积累的途径，主要有通过食物、鳃和体表吸附 3 种途径。Langston 和 Spence^[7] 的研究表明，大多数鱼类对金属的吸收主要是通过食物途径。然而据 Zia 和 McDonald^[8] 的研究，鳃是一个重金属吸收的重要途径。由于本实验 Zn 和 I 存在于水体中，故本实验中这两种元素的积累应主要为鳃的途径。

罗国钧^[9] 的结果表明，鲫鱼通过内脏吸收 Zn 进入体内，主要积累分布于鱼鳞，其次为内脏而鱼肉中含量最低。阮晓等^[10] 报道，重金属主要蓄积于罗非鱼、淡水白鲳及鲤鱼的鳃、肝、肾等器官组织，肌肉重金属蓄积量明显低于鳃、肝、肾部位的蓄积量；Zn 在鲤鱼中主要积累于肝、鳃和肾中，肌肉中较少。Liang 等^[11] 认为内脏在鱼体贮藏微量元素（trace metals）中占有重要地位。综上所述，Zn 在动物体内主要分布于内脏而肌肉中则最

少, 在鱼体中其次是分布于鳞片和鳃。至于产生这种分布规律的原因, Allen^[12] 认为由于肝的解毒作用和肾的排泄作用, 组织内可诱导产生大量结合重金属的金属硫蛋白 (Metallothioneins, MT), 使肝、肾成鱼体内蓄积重金属的主要部位。Liang 等^[11] 认为在鱼体中, 内脏和肌肉中金属的积累与其代谢有密切联系, 而肌肉中的 Zn 质量分数与内脏中的 Zn 质量分数成正比, 而与鱼体长成反比。另外, 虽然 Zn 在肌肉中的浓度不高, 由于可不断地累积且其重量较大, 故 Zn 总量仍较高。另一方面, 作为营养金属的 Zn 在鱼体中长期积累后其含量不能靠某些特殊的组织的积累来判断鱼体的积累情况^[13]。本文积累实验 7d 时 Zn 在鲮鱼各器官分布为内脏>尾鳍>鳃>鳞片>剩余部分>眼球, 与其他人的实验结果基本一致。

从表 3 可知, I 的慢相半衰期为 5.8 d, Zn 的慢相半衰期为 8.6 d, 前者比后者短, 即鲮鱼对 I 的排泄比 Zn 快。动物对 Zn 和 I 积累速度和排泄速度上的差异, 在一定程度上是由元素本身的性质决定的。前者是二价阳离子, 与细胞膜内所带电荷相反, 故比较容易进入细胞而积累较快, 后者则因带一价负电荷而与细胞膜内电荷相同, 因而较难进入细胞而积累较慢。另一方面, 当离子从细胞向外运输时则恰好相反, 而是 I 排泄较 Zn 快。而在排泄过程中 Zn 和 I 在内脏中排泄较快, 而鳞片则反而有显著积累, 其他器官则没有明显规律。在动物骨代谢过程中, 锌是不可缺少的重要微量元素之一, 且骨骼中锌的含量较高^[14, 15]。因此对于排泄过程中鳞片的 Zn 质量分数一直上升, 我们有理由相信是由于 Zn 从内脏向骨质组织鳞片转移所造成的。Liang 等^[11] 认为已进入鱼体的食物中的金属元素, 首先被运送到胃和肠, 其后与在肾和肝中的 MT 结合, 最后再转运到肌肉, 而大部分将排出体外。由于 Zn 在动物体内是以离子形式存在, 在正常生理条件下鱼体内的金属硫蛋白是一种非酶的 Zn 结合蛋白^[8], 所以当外界离子浓度低时, 则可以游离态的形式排出体外。即内脏对这两种元素排泄较快也是由于这个原因。而对于排泄过程中鳞片 I 质量分数也一直上升, 这可能是由于其他器官排出的 I 重新分布于此, 与鳞片对 Zn 的排泄情况相近。

由于 Zn 在鱼体内的积累可能受一些金属离子的影响, 如钙离子可拮抗 Zn 从生物耐受 (biological acclimation) 和化学过程两种途径的吸收^[16], 故有必要开展进一步的实验以便更全面地

探究 Zn 在生物体内的行为。

参考文献:

- [1] 张瑞兰, 许郑林, 孙凤娥. 锌对免疫功能的调节作用[J]. 微量元素与健康研究, 1998, 15(4): 70—71.
- [2] 孟晋宏, 梁哲, 鞠躬. 锌对人体生理功能的影响及作用机制[J]. 微量元素与健康研究, 1997, 14(3): 54—56.
- [3] TSUNENOBU T. GOLDENBERG R L. Zinc nutriture and pregnancy outcome[J]. Nutriture Research, 1999, 16(1): 139—181.
- [4] 郭晓尉, 卢传华, 骆效宏. 补碘对缺碘机体免疫功能的影响[J]. 中国地方病学杂志, 2001, 6: 411—412.
- [5] 滕瑞涛, 王久春, 刘炯, 等. 碘缺乏病区与非病区儿童的智力水平和精神运动功能状况调查[J]. 中国公共卫生, 2000, 16(12): 1126—1130.
- [6] 胡怀明, 郝恩柱, 王洪林. 预防医学[J]. 北京: 人民军医出版社, 1999.
- [7] LANGSTON W J, SPENCE S K. Biological factors involved in metal concentrations observed in aquatic organisms // TESSIER A, et al, eds. Metal Speciation and Bioavailability in Aquatic Systems[M]. N Y: Wiley & Sons, 1995.
- [8] ZIA S, MCDONALD D G. Role of the gills and gill chloride cells in metal uptake in the freshwater uptake in the freshwater daped rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* [J]. Can J Fish Aquati Sci., 1994, 51: 2482—2492.
- [9] 罗国钧. 鲫鱼体内重金属的分布和积累规律研究[J]. 渝州大学学报(自然科学版), 2000, 17(1): 56—61.
- [10] 阮晓, 郑春霞, 王强, 等. 重金属在罗非鱼淡水白鲢和鲤鱼体内的蓄积[J]. 农业环境保护, 2001, 20(5): 457—459.
- [11] LIANG Y, CHEUNG R Y H, WONG M H. Reclamation of wastewater for polyculture of fresh waterfish: bioaccumulation of trace metals in fish. Water Research[J]. 1999, 33(11): 2690—2700.
- [12] ALLEN P. Soft tissue accumulation of lead in the blue tilapia, *Oreochromis aureus* (Steindahner), and the modifying effects of cadmium and mercury[J]. Bio Trace Element Res, 1995, 50(3): 193—208.
- [13] MCGEER J C, SZEDEDINSZKY C, MCDONALD D G. et al. Effects of chronic sublethal exposure to waterborne Cu, Cd or Zn in rainbow trout 2: tissue specific metal accumulation[J]. Aquatic Toxicology, 2000, 50: 245—256.
- [14] 余增丽, 李云. 锌对骨发育影响的体外研究[J]. 营养学报, 2002, 14(1): 21—24.
- [15] 史利军, 张乃生, 杨正涛. 锌参与动物骨代谢机理的研究进展[J]. 动物医学进展, 2002, 23(3): 30—32.
- [16] BARRON M G, ALBEKE S. Calcium control of zinc uptake in rainbow trout[J]. Aquatic Toxicology, 2000, 50: 257—264.

Accumulations and Distributions of Zinc
and Iodate in *Cirrhina molitorella*

XIE Rui wen¹, WU En ying², XIAO Zhou ye², ZHONG Chuang guang²

(1. Guangzhou Panyu Institute of Environmental Sciences, Guangzhou 511400, China;

2. School of life sciences, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Accumulation and elimination of Zn^{2+} and I^- in mud carp *Cirrhina molitorella* were studied with tracer techniques. Similar accumulation trends of Zn and I were observed, which could be expressed as $Y=30.729\ln(t)+45.983$ for Zn^{2+} and $Y=1.2743\ln(t)+2.0991$ for I^- respectively. Both Zn^{2+} and I^- were mainly distributed in viscera, on 7 d the concentration of Zn^{2+} in viscera was $235.48\mu g\cdot g^{-1}$ with ambient Zn concentration of $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, while the concentration of I^- in viscera was $0.49\mu g\cdot g^{-1}$ with ambient Zn concentration of $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Elimination of Zn^{2+} and I^- from mud carp was quite fast and the elimination course was composed of fast elimination phase (0~1 d) and slow elimination phase (1~13 d), and the slow elimination phase could be expressed as $Y=6.5688e^{-0.081t}$ 和 $Y=0.0388e^{-0.1201t}$ for Zn and I respectively. The half-lives of Zn^{2+} and I^- in the fish were 8.5 d and 5.8 d respectively. Elimination of these two element from viscera was faster than from other parts of the body.

Key words: Zn^{2+} ; I^- ; *Cirrhina molitorella*; accumulation; elimination; distribution; tracer techniques