

底泥中重金属对水生生物的影响*

I. 铅的不同形态对鱼类的毒性

郭永灿 周青山 谢锦云 欧德友 赖 勤

(湖南师范大学生物系 长沙 410006)

陈瑞生 刘彦欣 何雪双

(湖南省环境保护科学研究所 长沙 410004)

提 要

本文报道了模拟江河底泥中的铅对鲫鱼、鲤鱼等的生物效应,从生物富集、生物化学、超微结构、组织病理、血相等方面研究了底泥铅的不同化学形态的生物学效应。实验结果表明,当底泥中“亲和态”铅为 95.23 mg/kg 时,染毒 20—50 d,相继发生一系列病理变化,随着实验浓度的增加,时间的延长,病变就愈加严重;底泥铅的“亲和态”浓度与生物效应关系呈正相关。

关键词 铅,重金属,鱼类,毒性,底泥。

由于大量重金属污染物排入江河,重金属通过离子交换、吸附、络合、絮凝、共沉淀等作用,最终绝大部分进入河床表层沉积物中,相对使水质中重金属含量降低。而在条件变化时,又有一部分重金属由于扩散、解吸、溶解、氧化还原和络合作用,以及在物理、生物等因素的作用下,又从沉积物中向水相释放,造成次生污染。不过释放速率是很缓慢的,而底质中重金属不断在沉积物中积累,可超过水中含量几个数量级。底泥中重金属的大量积累具有潜在性的污染与危害。关于重金属形态的研究国外早已作了大量工作^[5-7]。近年来,国内也相继开展了这方面的研究^[1-3]。至于沉积物的生物效应研究,着重研究重金属与生物吸收累积之间的关系^[8-10]。沉积物中重金属形态划分,目前乃首推 Tessler 等(1979)提出的分析程序^[7]。国内学者考虑到重金属的生物效应,将底泥中重金属划分为易可给态,中等可给态和惰性态三类^[2]。鉴于底泥中重金属不同形态的毒性效应研究,国内还未见有报道,本文系模拟研究江河底泥铅的不同形态对鱼类的生物效应的结果。

材 料 与 方 法

(一) 实验材料与设备

1. 实验鱼 鲫鱼 (*Carassius auratus*) 平均全长 12.9 cm \pm 0.57, 平均体重 31.2g \pm

* 参加本工作的还有盛柏林、陈春光、刘玉蓉等同志,还得到了中国科学院生物物理所电镜室的同志帮助,特致谢意。

1988年10月8日收到。

± 1.65 。鲤鱼 (*Cyprinus carpio*) 平均全长 $15.6 \text{ cm} \pm 1.01$, 平均体重 $49.2 \text{ g} \pm 2.05$ 。黄鳝 (*Monopterus albus*) 平均体长 $32.17 \text{ cm} \pm 3.53$, 平均体重 $27.7 \text{ g} \pm 1.82$ 。均取自无污染源的长沙市郊岳北渔场。

2. 实验用底泥 取自湘江株洲江段枫溪港的对照断面表层沉积物, 其理化参数见表 1。

表 1 实验用底泥的理化参数

Tab. 1 The physical-chemical parameter of experimental sediment

pH	比表面 Specific surface area (m^2/g)	比重 Specific gravity (g/cm^3)	Eh (mv)	有机质 Organic matter	腐殖质 Humus	颗粒度 Granularity (%)					
						粗砂 Coarse sand	细砂 Fine sand	粗粉砂 Coarse silt	细粉砂 Fine silt	细粘土粒 Coarse clay particle	细粘土粒 Fine clay particle
7.4	49.35	2.45	77.6	1.3	0.51	5.6	10.55	31.05	32.32		20.4

3. 实验毒剂 硝酸铅 [$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$], AR。

4. 实验装置 为模拟江河流水环境, 特设计了流水环道式底泥重金属实验装置, 即用聚乙烯塑料焊接而成的椭圆形环道水池。内分隔成 3 个同心环道。环道水池外面积为: $201 \times 135 \times 75 \text{ cm}$; 3 个环道宽分别为 15、19、31.5 cm; 环道的底面积相等, 均为 7550 cm^2 , 其装水和底泥的容量相等。用电动机转动叶片推动池水往一个方向循环流动, 并在各环道中用无油空压机充氧, 使水中溶解氧维持 6 mg/L 左右。实验水温用空调机调节在 22°C 左右。两个实验装置共 6 个环道。

5. 实验用水 源自湘江长沙江段自来水, 经曝气一周。pH: 7.4, Eh: 60mV, DO: 6.2 mg/L , 电导: $1.08 \mu\text{S}$, 浊度: 8.27 mg/L , 硬度: 5.83° (德国制)。

(二) 实验方法

1. 底泥重金属配制 根据湘江底泥重金属污染的调查资料^[2], 模拟设计江河底泥重金属的各种实验浓度。方法是将不同设计浓度加入一定量的硝酸铅至水中溶解, 倾入泥水比为 1:10 的容器中充分搅拌, 使铅离子充分被吸收, 络合, 经 24 h 沉淀后, 弃上清液, 再加水搅拌, 又经 24 h 静置后去上清液, 然后倾入环道, 使环道中泥水比为 1:10 (即 38 kg 泥加 380 kg 水), 搅拌均匀后, 静置 24 h 即可供实验用。

2. 鱼类染毒 实验鱼先在室内驯养两周, 实验时随机选取大小一致健康的鱼种, 分别量体长测重分 6 组, 第 1 组为无重金属的对照组, 第 2—6 组为实验组。在实验期间, 每天定时定量投喂无污染的颗粒饵料或鱼虫一次。全程实验为 120 天。每组实验鱼 50 尾, 分期分批取样分析。染毒 20 d 后第一次取样, 以后每隔 10 d 取样一次, 每次每组取鱼 5 尾。同时取水样、泥样进行铅的形态与总量测定。水形态用阳极溶出伏安法测定, 底泥铅形态按 Tessler 等分类法划分^[7], 用 180-80 型原子吸收仪测定。

3. 富集实验样品处理 样品鱼用聚四氟乙烯塑料刀去鱼鳞, 去离子水洗涤多次, 再用塑料刀剥皮去骨, 将肌肉制成肉样; 肝、肾、脾及性腺除去结缔组织; 鳃弓鳃耙充分用去

离子水洗涤吸干。样品用硝酸、高氯酸消化,用 180-80 型原子吸收仪测定。

4. 生化指标分析方法 从心脏或尾动脉抽血,用对二甲氨基甲醛显色法测定鱼类全血的 δ -氨基乙酰丙酸脱水酶(简称 δ -ALAD)活性;用沙利氏法测定血红蛋白含量;用聚丙烯酰胺凝胶电泳法测定肝、肾、心、脑等组织的乳酸脱氢酶(简称 LDH)及血清蛋白含量。

5. 超微结构的实验方法 将鱼组织双重固定,脱水后用 Epon 812 包埋, LKBV 型切片机超薄切片,染色后,在 100 Cx 型透射电镜下观察。

6. 病理组织学观察 将鱼肝、肾、心、肠等组织用 Bouin 氏液固定,石蜡包埋,切片用 H·E 染色,在光学显微镜下观察、照相。

7. 血相观察 从鱼心脏或尾动脉取血涂片,用 Wright-Giemsa 氏染色液染色后,进行微核率检查;血细胞用纽巴氏改良计数板进行计数。

结果与分析

(一) 底泥的形态分配

10 次取样分析底泥铅的形态分配结果与湘江表层沉积物重金属形态的分布是一致的^[2],都是以残渣态为主,其次是铁锰氧化结合态(表 2)。

表 2 实验沉积物铅的化学形态分布

Tab. 2 The distribution of different forms of lead in experimental sediments

组 别 Group	化 学 形 态 Chemical species							总 量 Total
	水可溶态 Water soluble	阳离子可交换态 Cation exchangeable	碳酸盐结合态 Carbonate-bound	铁锰氧化结合态 Fe-Mn oxide-bound	有机质硫化物结合态 Organic matter and sulfide-bound	残渣态 Residual	亲和态 Affinited	
1	0.22	18.42 (9.27)*	9.50 (4.78)	17.50 (8.81)	5.75 (2.89)	147.50 (74.24)	51.17 (25.76)	198.67
2	0.51	33.03 (7.86)	9.80 (3.18)	44.60 (14.47)	7.80 (2.53)	221.83 (71.96)	95.23 (28.04)	317.12
3	0.065	38.04 (4.21)	11.50 (1.88)	208.74 (34.04)	10.71 (1.75)	356.52 (58.13)	268.99 (43.00)	625.51
4	0.101	62.16 (6.56)	22.37 (2.36)	204.78 (21.25)	6.68 (0.710)	650.97 (68.74)	296.19 (31.30)	946.94
5	0.123	118.14 (5.21)	38.22 (2.51)	485.00 (30.10)	6.27 (0.41)	940.00 (61.77)	647.63 (38.23)	1580.63
6	0.174	305.45 (16.01)	129.42 (6.78)	825.75 (33.07)	10.53 (0.55)	831.70 (43.58)	1271.32 (57.69)	2103.02

* 百分含量(%)

(二) 铅的不同形态与鱼类富集的关系

底泥铅在三种鱼类组织中的含量列于表 3。

表 3 鱼类组织器官中铅的含量 (mg/kg 湿重)

Tab. 3 The contents of lead in fish tissue and organ. (mg/kg)

组 别 Group	鲫鱼 <i>C. auratus</i>						鲤鱼 <i>C. carpio</i>	黄 鲢 <i>M. albus</i>
	肝 脏 Liver	肾 脏 Kidney	脾 脏 Spleen	精 巢 Testes	卵 巢 Ovary	肌 肉 Muscle	肌 肉 Muscle	肌 肉 Muscle
1	0.45	1.30	2.89	1.92	0.49	0.01	0.01	0.01
2	0.71	3.19			0.44	0.02	0.01	0.13
3	2.41	3.97		0.57	0.62	0.02	0.01	0.14
4	2.76	5.77	7.14	0.72	0.45	0.03	0.02	0.15
5	5.16	6.90		0.66	0.92	0.03	0.03	0.44
6	7.88	7.65		0.56	1.07	0.05	0.03	0.93

从表 3 可知,铅在鱼类肌肉中的富集量:黄鲢>鲫鱼>鲤鱼,但在同种鱼中肌肉的富集量最低,如鲫鱼的富集量是脾脏>肾脏>精巢>肌肉。富集量与形态的相关性列于表 4。从表 4 看出,铅的水可溶态、阳离子可交换态和碳酸盐结合态与鲤、鲫鱼肌肉、内脏、鳃的铅含量,其相关系数 r 有高度的显著性,而各器官的含铅量与底泥铅的有机质结合态、

表 4 底泥铅的各种化学形态与鱼类组织铅含量的相关分析

Tab. 4 Correlations between the lead contents of fishes and various forms of lead in sediments

器 官 Organ	鱼 名 Species	化 学 形 态 Chemical forms						总 量 Total lead
		水可溶态 Water soluble	I 态 I	II 态 II	III 态 III	IV 态 IV	V 态 V*	
肌 肉 Muscle	<i>C. auratus</i>	++**	++	++	+	—	—	++
	<i>C. carpio</i>	++	++	++	+	—	—	++
内 脏 Gut	<i>C. auratus</i>	++	++	++	—	—	—	++
	<i>C. carpio</i>	++	++	++	—	—	—	+
鳃 Gill	<i>C. auratus</i>	++	++	++	—	—	—	+
	<i>C. carpio</i>	++	++	++	—	—	—	—
性 腺 Gonad	<i>C. auratus</i>	—	—	—	+	+	—	—
	<i>C. carpio</i>	+	+	+	—	—	—	+

* I 态=阳离子可交换态 Cation exchangeable; II 态=碳酸盐结合态 Carbonate bound; III 态=铁 锰 氧化结合态 Fe-Mn oxide-bound; IV 态=有机质硫化物结合态 Organic matter and sulfide bound; V 态=残渣态 Residual

** ++ 具高度显著性差别 Highly significant different ($P < 0.01$)

+ 具显著性差别 significant different ($P < 0.05$)

— 无显著性差别 Non significant different ($P > 0.05$)

残渣态的相关系数 r 没有显著性。还可看出,鲤鲫鱼肌肉及鲫鱼内脏含铅量与底泥铅的相关系数 r 呈高度的显著性。此结果与 Ken. J. Hall^[8] 的调查研究结论是一致的。

目前,多数学者认为,重金属的可溶态具有高度生物可给性,而阳离子可交换态是沉积物中不稳定部分,对生物亦有较高的可给性,碳酸盐结合态在弱还原以至氧化环境中亦可溶解,具有一定可给性。本研究表明,水可溶态、阳离子交换态、碳酸盐结合态均具有较高的生物可给性,至于铁锰氧化物结合态和有机质结合态是较稳定的部分,但在环境变化时也能部分解吸,具潜在的生物可给性。故试将重金属形态粗划分为两类:亲和态和惰性态。所谓“亲和态”(Affinity form)是指对生物有结合能力或可为生物利用的有关金属形态。如重金属的第 I、II、III 态对生物有较大的可给性,能为生物所利用,第 IV 态在某些情况下仍可为生物所利用,故统称为“亲和态”。而残渣态即指存在矿物晶格里的痕量金属,其稳定不能为生物吸收利用,称为惰性态。这与有些学者^[2]的划分是一致的。

(三) 底泥铅不同形态对鱼类生化指标的影响

1. 对鱼类 δ -ALAD 活性的影响 血液中 δ -ALAD 活性是随各浓度组铅含量的升高而下降,经 t 检验,实验组与对照组的 δ -ALAD 活性有显著性差异,表明底泥铅对鱼类 δ -ALAD 活性起明显的抑制作用(表 5)。

表 5 不同浓度组与对照组 δ -ALAD 活性之间差异的显著性分析

Tab. 5 T-test of the δ -ALAD activity between the various experimental groups and the control

鱼名 Fish	组别 group	δ -ALAD 活力 \pm S.D δ -ALAD activity \pm S. D	n	t	p
<i>C. auratus</i>	1	344.5 \pm 1.393	8	3.416	0.02
	2	260.6 \pm 12.005	8	3.416	0.02
	3	249.0 \pm 8.669	8	3.416	0.02
	4	232.8 \pm 11.556	7	3.157	0.02
	5	200.7 \pm 13.583	8	5.789	0.002
	6	161.5 \pm 43.155	8	5.637	0.001
<i>C. carpio</i>	1	597.7 \pm 18.75	9		
	2	483.6 \pm 4.161	7	2.931	0.02
	3	467.8 \pm 7.914	8	2.986	0.02
	4	457.4 \pm 11.003	6	2.875	0.05
	5	447.5 \pm 1.779	7	4.475	0.01
	6	393.8 \pm 8.483	9	3.631	0.01
<i>M. albus</i>	1	183.2 \pm 5.066	7		
	2	103.6 \pm 0.770	7	3.690	0.02
	3	91.2 \pm 0.697	7	6.122	0.02
	4	71.6 \pm 1.204	7	6.122	0.001
	5	64.8 \pm 0.732	7	6.165	0.001
	6	57.9 \pm 1.552	7	6.425	0.001

另从底泥铅不同形态与鱼类 δ -ALAD 活性的相关关系列于表 6 看出,鲤、鲫鱼全血 δ -ALAD 活性与底泥铅各形态含量均呈负相关。鲤、鲫 δ -ALAD 活性与铅的 I 态、III 态,及鲫鱼 δ -ALAD 活性与铅 II 态的相关系数 r 有显著性差异。而与 IV 态, V 态以及鲤鱼 δ -ALAD 活性与 II 态的相关系数 r 没有显著性。鲤、鲫 δ -ALAD 活性与底泥

表 6 底泥铅的不同形态对 δ -ALAD 活性的影响关系Tab. 6 Effect of various forms of lead in the bottom sediment on the activity of δ -ALAD

鱼 名 Fish	化 学 形 态 Chemical species										总 量 Total lead	
	I 态		II 态		III 态		IV 态		V 态			
	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p		
<i>C. auratus</i>	-0.73	<0.05	-0.68	<0.05	-0.83	<0.05	-0.59	>0.1	-0.60	>0.05	-0.82	<0.05
<i>C. carpio</i>	-0.81	<0.05	-0.75	<0.05	-0.85	<0.05	-0.50	>0.1	-0.70	>0.05	-0.91	<0.05

铅总量亦呈负相关。其相关系数 r 具有显著性,这说明底泥铅总量对鱼类 δ -ALAD 活性影响是明显的,其结果与上述富集作用的结论是一致的。

2. 对鲫鱼 LDH 同工酶的影响 鲫鱼染毒 20 d 后,肾组织中 LDH 同工酶第 3—6 组酶带变窄;50 d 后,各实验组 LDH 2—5 酶带几乎消失,酶活性显著下降,说明肾功能受到底泥铅的严重损伤。鲫鱼肝组织 LDH 同工酶在染毒 40 d 后,第 5—6 组的酶活性显著增加,特别 LDH_{4,5} 酶带加宽加深;50 d 后,第 3—6 组的酶活性增加更快。但染毒 60 d 后,肝组织各组酶活性下降;100 d 后,肝酶活性下降更明显,这说明肝细胞产生了不可逆的损伤。鲫鱼血清 LDH 同工酶在染毒 40 d 后,实验组的同工酶酶带增宽,着色渐深,说明酶活增加,特别 LDH_{2,4} 酶带变化更为明显。70 d 后,各实验组酶活性增加更明显。这与杨端等^[4]的报道是一致的。

鲫鱼心、脑 LDH 同工酶,经染毒 20 d 后,酶活性开始下降,后随染毒时间的增长下降更明显。

(四) 底泥铅对鱼类组织与肾细胞结构的影响

鲫鱼染毒后肾细胞超微结构变化:染毒 20 d 后,第 3—4 组肾小管管腔扩大,上皮细胞线粒体普遍轻度肿胀,基质出现嗜钺颗粒;细胞核核周腔扩大成许多不规则的囊泡(图版 I:1) 第 5—6 组肾上皮细胞普遍出现线粒体肿胀,基质透明化,少数线粒体膜和嵴解体出现空白区。胞质中有许多细胞解体碎片。50 d 后,第 5—6 组肾上皮细胞胞质中出现许多空泡,有些线粒体嵴出现解体(图版 I:2)。80 d 后,肾小管管腔更扩大,上皮细胞线粒体严重肿胀,有的线粒体解体或部分解体,呈大小空白区(图版 I:3);有的线粒体呈絮状不透明的沉钙现象。质膜皱褶局部解体,内质网扩张产生囊泡或碎片,其核糖体脱落;核膜也解体,核质外溢,胞内其它细胞器大为减少。

鲤鱼中毒后的组织结构变化:染毒 80 d 后第 2 组鲤鱼肾小管上皮细胞肿胀,管腔变窄;第 4 组出现个别肾小球肿胀使肾小球囊腔变小;同时可发现各实验组小肠粘膜肿胀,绒毛上皮层与固有层分离成空腔(图版 I:4)。染毒 90 d 后,肠上皮坏死或脱落。100 d 后,肝组织实质细胞肿大,血窦变窄,胞质稀淡透明,核固缩,有的肝细胞比正常细胞增大 2—6 倍,呈气球状的水样变性(图版 I:5)。染毒 120 d 后,肾小球出现纤维化或呈玻璃样变,肾组织局部坏死;肝组织也呈局灶性坏死。此时可发现心肌纤维有局部断裂,并有红

细胞浸润。

上述结果表明,鱼类铅中毒后,首先发生细胞超微结构变化,然后才发生组织结构变

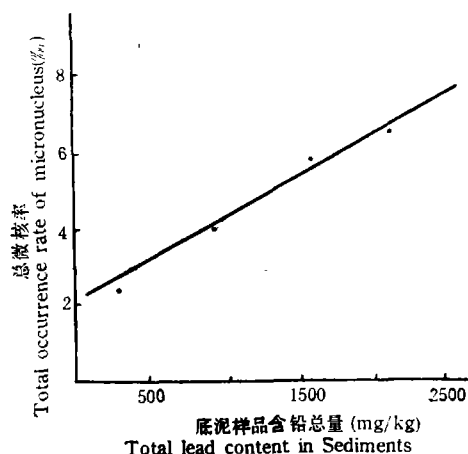


图1 底泥铅各组含量与总微核率的均值关系

Fig. 1 Relationship between the lead content in bottom sediments and the average total occurrence rate of micronucleus.

化。尤以肾小管上皮细胞对铅毒极为敏感, Ginn(1968)^[11] 将鱼肾小管上皮细胞超微结构的损伤划分五期:第1期为正常细胞,第2、3期属可逆性损伤,第4期为转变期,第5期为不可逆性损伤,是细胞坏死期,其主要特征是:线粒体基质内有两类不透明区,即絮状不透明区和钙化沉积物;胞核溶解,核质溢出,在质膜和基膜内褶部见有一些中断处。本实验表明,染毒20 d以后的底泥铅亲和态1277.10 mg/kg组肾小管上皮细胞中毒损伤反应均可进入第5期。

(五) 底泥铅对鲫鱼血细胞微核率的影响

鲫鱼经底泥铅染毒后,血细胞微核率列于表7。本研究证明,微核率随底泥铅的浓度增加而增加。从各实验组与表7的总微核率(微核+核碎解)进行生物统计处理,由回归方程求得回归直线(图1),说明呈正相关。其回归方程为 $\hat{y} = 1.15875 + 0.001725x$ 。

表7 鲫鱼血细胞的总微核率(%)与t检验

Tab. 7 T-tests on the total occurrence rate of micronuclei in blood cells of *C. auratus*

组别 Groups	采样次序 Number of times take sample								$\bar{X} \pm S.D$	t	P
	1	2	3	4	5	6	7	8			
1	0.476	0.986	0.675	0.675	0.409	0.794	0.423	0.426	0.609 ± 0.09		
2	1.702	1.423	1.520	1.376	1.828	2.952	3.864	2.810	2.184 ± 0.913	4.45	<0.001
4	3.142	3.293	3.600	3.930	4.270	4.826	4.180	4.780	4.003 ± 0.33	16.184	<0.01
6	4.503	4.605	6.606	5.961	6.585	6.897	7.090	10.080	6.541 ± 1.73	9.687	<0.001

从表7可知,铅染毒40、60、70、80 d后,各实验组与对照组比较均呈显著性差别或高度显著性差别($P > 0.01$ 或 $P < 0.01$)。说明经底泥铅染毒40 d后,可使鲫鱼血细胞核发生严重的损伤,也说明鱼类微核率测定是评价底泥重金属污染因子诱变活力的有效手段。

参 考 文 献

- [1] 孙秉一等, 1980. 胶洲湾东北部海水中铅的形态及其分布. 山东海洋学院学报, 10(1): 79—89.
- [2] 毛美洲等, 1981. 湘江表层底泥中重金属化学形态的研究. 环境科学, 2(5): 35—41.
- [3] 陈静生等, 1987. 铜在沉积各相中分配的实验模拟与数值模拟研究. 环境科学学报, 7(2): 140—149.
- [4] 杨 端等, 1981. 青、草、鲢、鳙的乳酸脱氢酶同工酶谱及其与毒物作用的关系. 环境科学学报, 1(3): 250—257.
- [5] Christophe M., 1983. Speciation of copper, Lead, Nickel and Zinc in Meuse river. *Water. Res.* 17(6): 641—649.
- [6] Florence, T. M., 1982. the speciation of trace elements in waters. *Talanta*, 29: 345—364.
- [7] Tessler, A., Campbell, P. G. C. and Bisson, M., 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Anal. Chem.*, 51(7): 844—850.
- [8] Ken J. Hall and Kuldips, S. Bindra., 1979. Geochemistry of selected metals in sediments and factor affecting organism concentration.
- [9] Standahl, D. H. and Sprague, J. B., 1982. Effects of water hardness and pH on vanadium lethality to rainbow trout. *Water. Res.* 16(10): 1479—1488.
- [10] Vinikour, W. S., Goldstein, R. M. and Anderson, R. V., 1980. Bioconcentration patterns of Zinc, Copper, Cadmium and Lead in selected fish species from the Fox River, Illinois. *Bull. Environm. Contam. Toxicol.* 24: 727—734.
- [11] Ginn, F. L., 1968. Disorders of cell volume regulation. I. Effects of inhibition of plasma membrane adenosine triphosphatase with ouabain. *Amer. J. Pathol.* 53: 1041—1050.

TOXICITY OF HEAVY METALS IN RIVER SEDIMENTS TO AQUATIC ORGANISMS

I. TOXICITY OF VARIOUS FORMS OF LEAD TO FISHES

Guo Yongcan Zhou Qingshan Xie Jinyun Ou Deyou Lai Qin

(Department of Biology, Hunan Normal University, Changsha 410006)

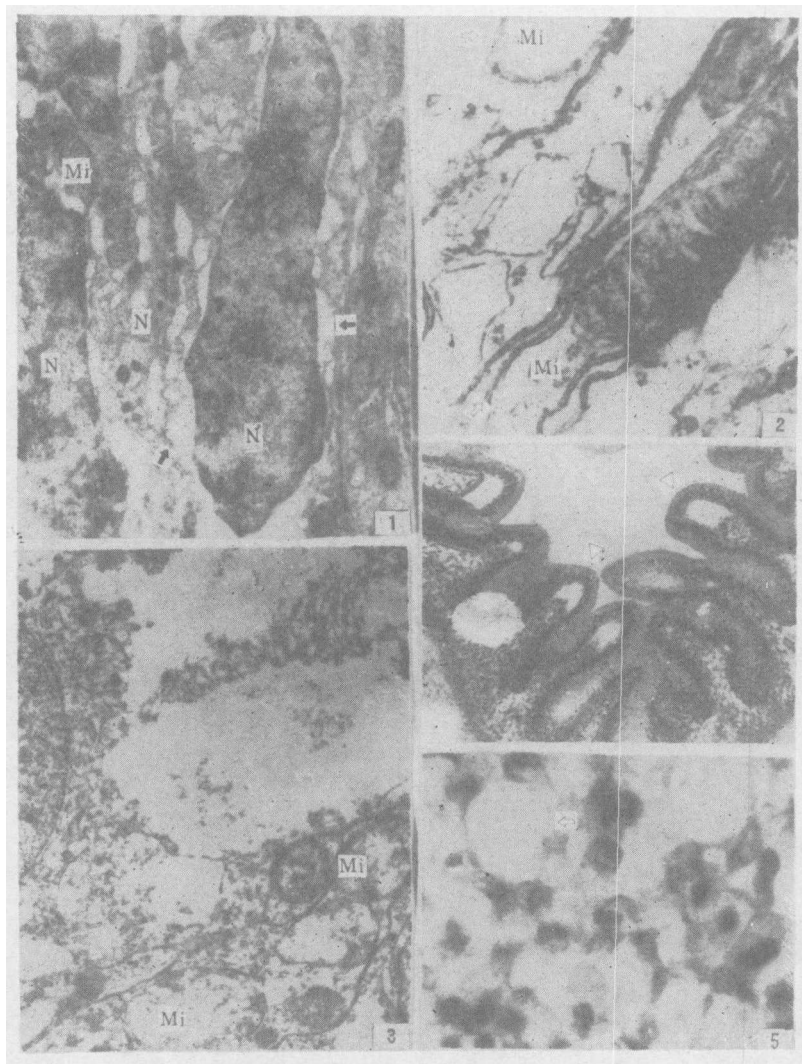
Chen Ruisheng Liu Yanxin and He Xueshuang

(Institute of Environmental Protection, Hunan Province, Changsha 410004)

Abstract

The toxicity of sedimental lead to common carp (*Cyprinus carpio*), Crucian carp (*Carassius auratus*) and other fishes was studied in an artificial stream. Investigations were made on the biological accumulation, biochemistry, ultramicroscopic structure, tissue pathology and blood assays of the fishes, fish exhibited a series of pathological changes after 20—50 days exposure to the affinity form of lead at 95.23mg/kg. The pathological effects were positively correlated with the concentration of affinity lead.

Key words Lead, Heavy metal, Fish, Toxicity, Sediment.



1. 鲫鱼的肾管上皮细胞出现轻度损伤(←示核周腔扩大), 线粒体完好, $\times 8864$; 2. 鲫鱼肾上皮细胞线粒体肿胀, 并有不同程度的解体, $\times 22160$; 3. 各组均出现广泛性超微结构变化, 同时线粒体大部分解体, $\times 9200$; 4. 小肠绒毛上皮层与固有层分离成腔(Δ), $\times 53.6$; 5. 肝细胞产生空泡化(\Leftarrow), $\times 536$

1. The epithelial cells of the kidney tubule were slightly damaged in the Cruciar carp (Arrow shows enlargement of the perinuclear cavity), the mitochondria were undamaged, $\times 8864$; 2. Swelling and disintegration of varions degrees occurred in the renal epithelial cells in Cruciar. carp. $\times 22160$; 3. Extensive ultramicroscopic changes occurred in all groups, most mitochondria were disintegrated, $\times 9200$; 4. The epithelial layer of the intestine villi was separated from its inherent layer, forming a cavity(Δ), $\times 53.6$; 5. Vacuolization occurred in liver cells(\Leftarrow), $\times 536$

Mi (线粒体); N (细胞核)