

文章编号: 1004 - 7271(2001)04 - 0298 - 05

Cu²⁺、Zn²⁺、Cd²⁺对罗氏沼虾幼虾的毒性作用

戴习林¹, 臧维玲¹, 杨鸿山², 钟霞云², 江敏¹, 柯晓东¹

(1. 上海水产大学渔业学院, 上海 200090; 2. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090)

摘要:研究了铜、锌、镉三种金属对罗氏沼虾幼虾的毒性作用和积累作用。得到了Cu²⁺、Cd²⁺对罗氏沼虾幼虾(L=0.88±0.12cm, W=8.7mg)的24h、48h、72h、96h LC₅₀及安全浓度, 两者对罗氏沼虾的毒性: Cd²⁺ > Cu²⁺。当0.01mg/L ≤ Cu²⁺ ≤ 0.10mg/L, 0.002mg/L ≤ Cd²⁺ ≤ 0.008mg/L, 0.05mg/L ≤ Zn²⁺ ≤ 0.85mg/L时, 幼虾处在各重金属的各浓度试液中经过20d (Cu²⁺、Cd²⁺)和14d (Zn²⁺)的饲养, 均遭受了程度不等的毒性作用, 幼虾体长、体重增长率与成活率均不同程度的降低, 试验虾体内的Cu²⁺绝对积累量随着重金属浓度的升高而增加, Zn²⁺ ≤ 0.45mg/L时, 幼虾对其绝对积累量随着重金属浓度的升高而增加。受试幼虾对三种重金属积累倍数随着浓度的上升而下降。

关键词:罗氏沼虾; 幼虾; 重金属; 增长率; 存活率; 积累量

中图分类号: S912 **文献标识码:** A

The toxic effects of Cu²⁺, Zn²⁺, Cd²⁺ on giant freshwater prawn juvenile

DAI Xi-lin¹, ZANG Wei-ling¹, YANG Hong-shan², ZHONG Xia-yun², JIANG Min¹, KE Xiao-dong¹

(1. Fisheries College, SFU, Shanghai 200090, China; 2. East China Sea Fisheries Research Institute, CAFS, Shanghai 200090, China)

Abstract: This study deals with the toxic effects and the accumulative action of Cu²⁺, Cd²⁺, Zn²⁺ on giant freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) juvenile (L = 0.88 ± 0.12 cm, W = 8.7 mg) and obtain 24h, 48h, 72h, 96h LC₅₀ of Cu²⁺ and Cd²⁺ on giant freshwater prawn juvenile. The toxicity of Cd²⁺ is greater than that of Cu²⁺. After juveniles were cultured for 20 days in the test solution (at 0.01 mg/L ≤ Cu²⁺ ≤ 0.10 mg/L, 0.002 mg/L ≤ Cd²⁺ ≤ 0.008 mg/L), and for 14 days (at 0.05 mg/L ≤ Zn²⁺ ≤ 0.85 mg/L), the test prawns suffered different toxicity of Cu²⁺, Cd²⁺, Zn²⁺ and growth and survival rates of juveniles decreased. Accumulative capacity (Ac, mg/kg) of Cu²⁺ in the test juveniles body increased with rising concentration of Cu²⁺. Ac of Zn²⁺ increases respectively with rising concentration (0.05 mg/L - 0.45 mg/L). The accumulative multiple (At) of three heavy metals in the test juveniles body decreased with concentration rise.

Key words: *Macrobrachium rosenbergii*; juvenile prawn; heavy metal; growth rate; survival rate; accumulative capacity

近几年来, 由于淡水四大家鱼养殖效益下降和对虾疾病的蔓延且目前对其尚无明显的治疗方法, 因此具有个体较大、肉味鲜美且易养殖等特点的罗氏沼虾(*Macrobrachium rosenbergii*)成为渔民选择的养殖

收稿日期: 2001-03-28

第一作者: 戴习林(1969-), 男, 江苏泰兴人, 讲师, 主要从事特种水产增养殖和水环境保护方面研究。E-mail: dxleyk@online.sh.cn

对象,养殖户取得了较好的经济效益。但随着工业的发展,锌、铜、镉等重金属作为工业大量使用的原料,工厂的排污废水又将一定量的重金属排入江河,严重污染水质,易造成水生生物的重金属中毒,并产生重金属积累,通过食物链危害人体的健康。近年来,有关重金属对罗氏沼虾的急性中毒的报道较多^[1,2],但对于重金属对罗氏沼虾的非急性毒性作用及其积累作用报道较少。本试验旨在研究重金属对罗氏沼虾幼虾的毒性作用,及其在罗氏沼虾幼虾体内的积累作用,以期为环境保护、渔业用水和养殖水质管理提供科学的依据。

1 材料与方 法

1.1 试验基础用水及其主要的离子含量测定

试验于1999年4~5月在金山漕泾上海申漕特种水产开发公司育苗场进行,试验基础用水为当地深井水,其主要离子含量采用容量法测定^[3,4],其所含的试验用金属离子以原子吸收分光光度法计(惠浦上海分析仪器有限公司产品,3500G)测定,受试虾体内重金属积累量采用生物体分析测定^[5]。

表1 漕泾地区深井水的主要离子含量

pH	Mg^{2+}	Ca^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	Cl^-	SO_4^{2-}	$\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$	总量
8.7	21.89	64.26	45.20	30.10	5.76	356.24	523.46

1.2 试验用 虾

试验用虾为公司所培育出池幼虾。

1.3 试验容器与试液

试验容器为40cm×40cm×20cm的塑料箱,按试验要求量将准确配制的 $\text{ZnSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CdCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 母液加入深井水调制而成试验用水。水温恒定为 $24 \pm 1^\circ\text{C}$ 。

1.4 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 对罗氏沼虾幼虾的急性中毒作用测定

根据经验与有关资料^[1,2,6,7],设定 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 对罗氏沼虾急性中毒试验各6个浓度组,并配有平行组。每组放入经饥饿1d的幼虾30尾($L = 8.8 \pm 1.2\text{mm}$, $W = 8.7\text{mg}$),试验期间连续充气,箱顶3/4以黑色尼龙薄膜遮光(以下同),隔天换水1/2。每天定时观察记录虾的活动等状况,将试验结果回归处理求得重金属的半致死浓度(LC_{50})。

1.5 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 与 Cd^{2+} 对罗氏沼虾的亚急性毒性作用测定

试验方案设定 Cu^{2+} 试液浓度为0.01、0.03、0.04、0.05、0.06、0.07、0.10mg/L, Zn^{2+} 试液浓度为0.05、0.25、0.45、0.65、0.85mg/L, Cd^{2+} 试验浓度为0.002、0.003、0.004、0.005、0.007、0.008mg/L,均设有平行组和对照组。每组均放养已用当地深井水暂养稳定后的罗氏沼虾幼虾100尾,按上述浓度要求加入各重金属的母液。每隔4h投饵一次,饵料为蛋羹、碎鱼肉;每天排污,隔天换水1/4,每日定时观察虾的活动等状况。 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 组试验20d, Zn^{2+} 组饲养14d,并于饲养前和试验结束后测取幼虾体长与体重,并计算体长增长率 $[(\text{试验末体长}(L_{\text{end}}) - \text{试验初体长}(L_{\text{pre}}))/L_{\text{pre}} \times 100\%$ 和体重增长率 $[(\text{试验末体重}(W_{\text{end}}) - \text{试验初体重}(W_{\text{pre}}))/W_{\text{pre}} \times 100\%$ 。

1.6 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 与 Cd^{2+} 在罗氏沼虾幼虾体内积累量的测定

分别测定经20和14d饲养后各组中成活的罗氏沼虾幼虾单位体重体内的重金属含量(即绝对积累量 A_c ,mg/kg),并按下式求累积倍数(A_t):

$$A_t = \frac{\text{虾体内重金属含量}(\text{mg/kg})}{\text{水中该重金属浓度}(\text{mg/L})}$$

2 结果与讨论

2.1 Cu²⁺对罗氏沼虾幼虾的急性与亚急性毒性作用

Cu²⁺对罗氏沼虾幼虾半致死浓度列于表2。由表2可知,Cu²⁺对罗氏沼虾幼虾24h、48h、72h、96h LC₅₀值分别为0.120mg/L、0.104mg/L、0.098mg/L、0.097mg/L,按重金属的特性,安全浓度(Sc)一般按下式求算^[6-8]: $0.01 \times 96h LC_{50}$,由此所求得的Cu²⁺对罗氏沼虾的Sc值为 $9.7 \times 10^{-4}mg/L$ 。明显低于王浚报道的Cu²⁺对罗氏沼虾($L = 1.5 \pm 0.2cm, W = 0.04g \pm 0.01g$)相应时间半致死浓度0.185mg/L、0.170mg/L、0.160mg/L、0.155mg/L和安全浓度0.00155mg/L^[9],此与试验虾个体大小有关,个体越大耐毒能力相应增加。规定渔业用水Cu²⁺不得超过0.01mg/L,可见据本试验结果所求得的Cu²⁺对受试虾的安全值均在渔业水质标准规定的范围内^[10]。

在本试验低浓度Cu²⁺试液中饲养20d后,罗氏沼虾幼虾生长和与存活情况列于表3。表3表明,当 $0.01mg/L \leq Cu^{2+} \leq 0.10mg/L$ 时,受试虾体长、体重与成活率随Cu²⁺上升而明显下降,各试验组幼虾的增长率及成活率均低于对照组,其体长、体重的增长与成活率分别为对照组的77.6%~95.7%、42.9%~92.5%和51.5%~99.0%。可见在Cu²⁺浓度为0.01~0.10mg/L的低浓度范围试液中经20d饲养的幼虾均程度不等地遭受了毒性作用,并影响了幼虾体长、体重的增长率和成活率。其中最低浓度组仅含Cu²⁺0.01mg/L,为我国渔业水质标准规定的允许界限值,但超过了本试验所求得的安全浓度 $9.7 \times 10^{-4}mg/L$,故对受试虾的生长与存活率产生了影响。

表2 Cu²⁺与Cd²⁺对罗氏沼虾幼虾的半致死浓度
Tab.2 LC₅₀ values of Cu²⁺, Cd²⁺ on giant freshwater prawn juvenile 24 ± 1°C (mg/L)

	24h	48h	72h	96h	安全浓度
Cu ²⁺	0.120	0.104	0.098	0.097	9.7×10^{-4}
Cd ²⁺	0.039	0.028	0.021	0.020	2.0×10^{-4}

表3 Cu²⁺对罗氏沼虾幼虾生长率和存活率的影响

Tab.3 The effects of Cu²⁺ on the growth and survival rates of giant freshwater prawn juvenile (%)

Cu ²⁺ 浓度 (mg/L)	对照组	1	2	3	4	5	6	7
	未检出	0.01	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.10
L _{end} (mm)	12.9 ± 2.0	12.7 ± 2.4	12.6 ± 2.0	12.4 ± 2.1	12.3 ± 1.9	12.3 ± 2.1	12.1 ± 2.1	11.8 ± 1.6
体长增长率(%)	55.4	53.0 (95.7)	51.8 (93.5)	49.4 (89.2)	48.2 (87.0)	48.2 (87.0)	45.8 (82.7)	42.2 (77.6)
W _{end} (mg)	69.4	65.3	57.9	57.7	59.1	58.3	45.9	38.4
体重增重率(%)	359.6	332.5 (92.5)	283.4 (78.8)	282.1 (78.4)	291.4 (81.0)	286.1 (79.6)	204.0 (56.7)	154.3 (42.9)
存活率(%)	97	96 (99.0)	95 (97.9)	95 (97.9)	82 (84.5)	86 (88.7)	78 (80.4)	50 (51.5)
Ac × 10 ⁻³ (mg/kg)	1.6	2.1	3.5	3.8	3.4	4.3	4.2	
At		213.0	166.7	94.8	68.2	70.9	60.8	

注:括号内数据为该组该项值与对照组相应值的百分比;(L_{pre} = 8.3 ± 0.7mm, W_{pre} = 15.1mg, T = 24 ± 1°C)。

由表3可看出,第4、5组的幼虾成活率偏低,此是试验中该两组较多的蜕壳虾的残食所致,较低的饲养密度即使两组幼虾体重增长率超过较其浓度低的第3组。试验中又发现,试验初始24小时内,第1~3组均无死亡,而第4~7组($0.05mg/L \leq Cu \leq 0.10mg/L$)分别死亡5、10、11、34尾受试虾,四天内第6、7组死亡数分别达到20尾与40尾。同时本试验另设浓度为0.13mg/L的试验组,四天内93%的受试虾中毒死亡,因而提前终止了试验。可见,当Cu²⁺ ≥ 0.05mg/L时,短时间内受试虾便产生了明显的中毒反应,致使成活率下降。特别是最高浓度组(0.10mg/L)受试虾饲养20d后仅存活50%。表3又表明,第1~3组的成活率与对照组甚为接近,即当时试验液对受试虾的毒性较弱。

表3还表明,幼虾体内对Cu²⁺的积累倍数随浓度增高而显著降低,当Cu²⁺浓度由0.01mg/L增加到

0.1mg/L 时,其积累倍数由 213 降至 60.78,但受试幼虾单位体重内对 Cu^{2+} 的积累量则以较小的增幅逐步增加,这一结果与文献[6,7]相一致。从表 3 发现,虽然对照组饲养水中 Cu^{2+} 未曾检测出,低于仪器检出限,但由于幼虾对重金属的富集作用极强,受试虾经 20d 的饲养,体内仍积累了一定量的 Cu^{2+} ($\text{Ac} = 1.6 \times 10^{-3} \text{mg/kg}$),以下的 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 也具有类似情况。

2.2 Cd^{2+} 对罗氏沼虾幼虾的急性与亚急性毒性作用

Cd^{2+} 对罗氏沼虾幼虾的半致死浓度列于表 2。表 2 表明, Cd^{2+} 对罗氏沼虾幼虾 24h、48h、72h、96h LC_{50} 值分别为 0.039mg/L、0.028mg/L、0.021mg/L、0.020mg/L,求得 Cd^{2+} 对罗氏沼虾的 Sc 值为 $2.0 \times 10^{-4} \text{mg/L}$,但由于 Cd^{2+} 具更强积累性,故也有人推荐依式 $0.005 \times 96\text{hLC}_{50}$ 求取 Sc 值^[8],则其 Sc 值应为 $1.0 \times 10^{-4} \text{mg/L}$ 。我国渔业水质标准规定渔业用水 Cd^{2+} 的浓度不得超过 0.005mg/L,可见本试验结果所求得的 Cd^{2+} 对受试虾的安全值均在渔业水质标准规定的范围内^[10]。由表 2 又看出, Cd^{2+} 对罗氏沼虾幼虾的 24h、48h、72h、96h LC_{50} 值及安全浓度均明显比 Cu^{2+} 低,分别是 Cu^{2+} 的 32.5%、26.9%、46.6%、48.5%、48.5%,可见 Cd^{2+} 对于罗氏沼虾幼虾的毒性远高于 Cu^{2+} ,这也是两种重金属通常对生物体所显示的致毒特点的反映^[11]。

低浓度 Cd^{2+} 对罗氏沼虾幼虾生长与存活率的测定结果列于表 4。表 4 表明,各试验组幼虾的体长与体重增长率、成活率及单位体重 Cd^{2+} 绝对积累量较为接近,而积累倍数则随 Cd^{2+} 浓度增加而降低,这表明当 $0.002 \text{mg/L} \leq \text{Cd}^{2+} \leq 0.008 \text{mg/L}$ 时, Cd^{2+} 对罗氏沼虾幼虾的毒性作用不随 Cd^{2+} 浓度升高而增加,并未表现出文献[6,7,11]和本试验中重金属 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 对幼虾的毒性随浓度的升高而增加的规律性。各试验组与对照组相比幼虾成活率均下降近 20%,但两者体长、体重增长率差异不大,此可能与各试验组幼虾密度降低有关;同时各试验组 Ac 值除第 1 组比对照组幼虾增加了 1 倍多外,其余各组均增加了近 6 倍。可见,当 $0.002 \text{mg/L} \leq \text{Cd}^{2+} \leq 0.008 \text{mg/L}$ 时, Cd^{2+} 对罗氏沼虾幼虾已存在毒性作用,具体表现为成活率下降和 Ac 值成倍上升。

表 4 Cd^{2+} 对罗氏沼虾幼虾生长率和存活率的影响

Tab.4 The effects of Cd^{2+} on the growth and survival rates of giant freshwater prawn juvenile

Cd^{2+} 浓度 (mg/L)	对照组	1	2	3	4	5
	未检出	0.002	0.004	0.005	0.006	0.008
L_{end} (mm)	12.9 ± 2.0	12.7 ± 2.7	13.2 ± 3.2	13.0 ± 3.3	12.7 ± 2.5	13.5 ± 2.6
体长增长率(%)	55.4	53.0 (95.7)	59.0 (106.5)	56.6 (102.2)	53.0 (95.7)	62.7 (113.2)
W_{end} (mg)	69.4	72.6	63.1	64.7	73.4	65.9
体重增长率(%)	359.6	380.8 (105.9)	317.9 (88.4)	328.5 (91.4)	386.1 (107.4)	336.4 (93.5)
存活率(%)	97	77 (79.4)	77 (79.4)	78 (80.4)	77 (79.4)	78 (80.4)
$\text{Ac} \times 10^{-4}$ (mg/kg)	1.5	3.9	10.5	10.0	10.1	10.1
At		198.0	461.9	205.8	167.9	125.8

注:括号内数据为该组项值与对照组相应值的百分比;($L_{\text{pre}} = 8.3 \pm 0.7 \text{mm}$, $W_{\text{pre}} = 15.1 \text{mg}$, $T = 24 \pm 1^\circ\text{C}$)。

2.3 低浓度 Zn^{2+} 对罗氏沼虾幼虾生长与存活的影响

表 5 为 Zn^{2+} 对罗氏沼虾幼虾生长与存活率影响的测定结果。表 5 表明,当 $0.05 \text{mg/L} \leq \text{Zn}^{2+} \leq 0.085 \text{mg/L}$ 时,受试虾体长、体重增长率与成活率均低于对照组,其体长、体重的增长率与成活率分别为 25.0% ~ 34.2%、67.6% ~ 120.2% 和 35% ~ 73%。可见受试虾在低浓度 Zn^{2+} 各试液(0.05 ~ 0.85mg/L)饲养 14d 后均较为明显地遭受程度不等的毒性作用,较为显著影响了幼虾生长和成活,即使低于渔业水质界限值($\leq 0.1 \text{mg/L}$)的 0.05mg/L 试验组,其成活率也仅为对照组的 75.3%,体重仅为对照组的 71.6%,表 5 表明,第 4 组(0.45mg/L)幼虾的体长、体重的增长率最低,此可能与该组幼虾具有最高绝对

积累量(0.019mg/kg)有关。

表5还表明,幼虾体内对 Zn^{2+} 的积累倍数随浓度增高而显著降低,当 Zn^{2+} 浓度由0.05mg/L增加到0.45mg/L增加到0.85mg/L时,受试幼虾单位体重内对 Zn^{2+} 的积累量则以较小的幅度减小,这一结果与 Cu^{2+} 对幼虾的毒性作用不一致。此可能是 Zn^{2+} 在虾体内积累量达到一定值时,将对虾体的正常的生理功能产生一定破坏作用,从而影响了虾体对 Zn^{2+} 的高集作用。

表5 Zn^{2+} 对罗氏沼虾幼虾生长率和存活率的影响

Tab.5 The effects of Zn^{2+} on the growth and survival rates of giant freshwater prawn juvenile

Zn^{2+} 浓度 (mg/L)	对照组	1	2	3	4	5
	未检出0.05	0.25	0.45	0.65	0.85	
L_{50} (mm)	14.0±1.4	13.1±2.5	12.8±1.7	12.2±1.4	12.8±1.7	12.4±1.9
体长增长率(%)	43.4	34.2 (78.8) [*]	31.1 (71.7)	25.0 (57.6)	31.1 (71.7)	27.0 (62.2)
W_{50} (mg)	83.0	68.3	68.3	52.0	55.4	52.8
体重增长率(%)	167.8	120.2 (71.6)	120.2 (71.6)	67.6 (40.3)	78.5 (46.8)	70.2 (41.8)
存活率(%)	97	73 (73.5)	64 (66.0)	49 (50.5)	35 (36.1)	35 (36.1)
$Ac \times 10^{-3}$ (mg/kg)	5.1	7.0	11.2	19.0	17.4	16.8
At		145.0	44.7	42.2	26.7	19.7

注:括号内数据为该组该项值与对照组相应值的百分比;($L_{pre} = 9.76 \pm 1.54$ mm, $W_{pre} = 31.0$ mg, $T = 24 \pm 1^{\circ}C$)。

3 结语

(1) Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 对罗氏沼虾幼虾($L = 0.66 \pm 0.9$ cm, $W = 8.7125$ mg)的24h、48h、72h、96h LC_{50} 及安全浓度分别为0.120与0.039、0.104与0.028、0.098与0.021、0.097与0.020、 9.7×10^{-4} 与 0.2×10^{-4} mg/L,对罗氏沼虾幼虾的毒性 $Cd^{2+} > Cu^{2+}$ 。

(2) 当 0.01 mg/L $\leq Cu^{2+} \leq 0.10$ mg/L时,饲养于其中的幼虾均遭受程度不等地毒性作用,受试虾体长、体重与成活率随 Cu^{2+} 上升而明显下降,幼虾体内对 Cu^{2+} 的积累倍数随浓度增高而显著降低,积累倍数由213降至60.78,但受试幼虾单位体重内的 Cu^{2+} 的积累量则以较小的增幅逐步增加。

(3) 当 0.002 mg/L $\leq Cd^{2+} \leq 0.008$ mg/L时, Cd^{2+} 对罗氏沼虾幼虾已存在毒性作用,各试验组幼虾的体长与体重增长率、成活率及单位体重 Cd^{2+} 绝对积累量(Ac)较为接近,而积累倍数则随 Cd^{2+} 浓度增加而降低, Cd^{2+} 对罗氏沼虾幼虾的毒性作用不随 Cd^{2+} 浓度升高而增加。

(4) 当 0.05 mg/L $\leq Zn^{2+} \leq 0.85$ mg/L时,饲养于其中的幼虾均较为明显地遭受程度不等的毒性作用, Zn^{2+} 较为显著地影响幼虾生长和成活率,幼虾体内对 Zn^{2+} 的积累倍数随浓度增高而显著降低,当 0.05 mg/L $\leq Zn^{2+} \leq 0.45$ mg/L时,受试幼虾单位体重内对 Zn^{2+} 的积累量以近50%的增幅逐步增加,但当 0.45 mg/L $\leq Zn^{2+} \leq 0.85$ mg/L时,受试幼虾单位体重内对 Zn^{2+} 的积累量则以较小的幅度减小。

参考文献:

- [1] 谢弘成,谢明慧.重金属对虾类急性毒性之研究[J].中国水产,1978,(316):13-16.
- [2] 林世深.汞、镉、锌对淡水长脚大虾及虱日鱼的急性毒性研究[J].中国水产,1980,(339):20-25.
- [3] 臧维玲.养鱼水质分析[M].北京:农业出版社,1991.36-44,58-67.
- [4] 汤鸿霄.水废水化学基础[M].北京:中国建筑工业出版社,1979.72-76.
- [5] 国家海洋局.海洋监测规范[M].北京:海洋出版社,1996.435-460.
- [6] Zang W L, Zhang J D, Bai X L. Toxic effects of Zn^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} and NH_3 on Chinese prawn [J]. Chin J Oceanol Limnol, 1993, 11(3):254-259.
- [7] Zang W L, Xu X C. Toxic effects of Zinc on four species of freshwater fish [J]. Chin J Oceanol Limnol, 1991, 9(1):64-70.
- [8] 湛江水产专科学校.养殖水化学[M].北京:农业出版社,1980.146-147.
- [9] 王凌.养虾资料汇编[M].台湾:牧文堂印刷有限公司,1986.543-548.
- [10] 陈佳荣,臧维玲,金送笛,等.水化学[M].北京:中国农业出版社,1996.201-205,260-261.
- [11] Forstner U, Wittmann G T W. Metal pollution in the aquatic environment [M]. Germany:Spring-Verlag Berlin Heidelberg, 1983. 12-45.