

酸性水对几种主要淡水鱼类的影响

张甫英 李辛夫

(中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

提 要

在实验室条件下, 研究了酸性水对几种主要淡水鱼类的毒性影响。结果表明, 这几种淡水鱼的胚胎和鱼苗的死亡率与 H^+ 浓度呈现相关性。在低 pH 水平下, 胚胎的发育进程明显地迟缓。要使鱼类受精卵正常孵化不受影响, 水中的 pH 值应保持在 6.5 以上。在受试的几种鱼类中, 没有发现对低 pH 敏感性有显著性差异, 但在各自的发育过程中, 其敏感性呈现出较大的差异。当 $pH < 6.0$ 时, 鱼的鳃组织就会受到损害。低 pH 加上铝, 则对鱼类呈现出协同毒性。水的硬度(或 Ca^{2+} 的含量)对 H^+ 和铝的毒性影响较大, 水质越软, H^+ 和铝的毒性越大。

关键词 酸性水, 鱼类, 毒性影响, pH, 敏感性

酸雨是当今全球关注的跨国界污染危害之一, 许多学者做了大量的工作, 国内外有许多有关酸雨的文献资料报道^[1-8]。

鉴于鱼苗和胚胎阶段是鱼类最敏感的时期, 因此作者较为系统地测试了低 pH 水平对我国的几种主要的淡水鱼类的胚胎发育, 孵化和存活, 以及鱼苗生长和存活的影响, 为酸雨防治对策提供有关生态学方面的科学依据。此外还测试了铝对鱼类的毒性以及水的硬度的影响, 因为在天然酸化的水体中, 无机铝浓度可达到使鱼类急性致死的水平($>0.2\text{mg/L}$), 而此时 pH 值也许尚未低到使鱼死亡的程度^[9]。较高的水硬度对低 pH 和铝的毒性有缓解作用^[9,10]。因此作者又同时研究了水的硬度对低 pH 和铝的毒性影响。

1 材料和方法

1.1 试验鱼

试验鱼以鲢鱼(*Hypophthalmichthys molitrix* Cuvier et Valenciennes), 鳙鱼(*Aristichthys nobilis* Richardson), 草鱼(*Ctenopharyngodon idellus* Cuvier et Valenciennes), 泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus* Cantor)的受精卵和鱼苗为材料。三种家鱼的受精卵和鱼苗由中国科学院水生生物研究所的养殖场提供。泥鳅的受精卵由室内人工繁殖所得。受精卵于囊胚期或原肠早期经镜检挑选健康的胚胎投入试验。将 5 日龄的草鱼苗和 7 日龄的鳙鱼苗转入实验室内, 第二天投入试验。泥鳅苗是在孵化出膜后一天进行试验。

1.2 试验水

试验用水有两种，一种是经活性炭脱氯后再静置24h 的自来水，总硬度为124.11 mg /L(CaCO₃), 总碱度为 2.29mg /L, 电导率为 418μs /cm, 酸化前各种离子的含量于表 1。

表 1 脱氯自来水酸化前的主要离子含量(mg /L)

Tab.1 Content of major ions of dechlorinated water before acidification (mg /l)

离 子 Ions	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
含 量 content	39.76	6.08	44.50	0	139.8	37.74	42.11

另一组为重组淡水，其成份于表 2。

表 2 重组淡水的成份

Tab.2 Composition for reconstituted freshwater

水 型 Water type	所需盐类(mg /L) Needed salt(mg /l)				硬 度 Hardness (mg /l CaCO ₃)	碱 度 Alkalinity (meq / l)
	NaHCO ₃	CaSO ₄ · 2H ₂ O	MgSO ₄	KCl		
很软的水 Very soft Water	12	7.5	7.5	0.5	10 — 13	0.20 — 0.26
软 水 Soft Water	48	30	30	2.0	40 — 48	0.60 — 0.70
硬 水 Hard water	192	120	120	8.0	160 — 180	2.20 — 2.40

1.3 试验方式

试验方式采用静水法和流水法二种。静水法是用 2mol / L 的硫酸在 8L 容积的玻璃缸里配制各种预定 pH 水平的酸性试验水。配制时充分搅拌，经常对 pH 值进行测定及调节，每天更换新鲜试液二次；流水法是向试验缸内连续供应脱氯自来水，通过磁性泵间断滴加硫酸，采用自制的微机系统控制加酸量，精确得到所需要的 pH 值，流量为 50ml / min。

1.4 试验水温

试验期间的水温在 21±2 ℃ 。

1.5 测定方法

总硬度和 Ca²⁺ 以 EDTA 法滴定。碱度以酚酞甲基橙法滴定。Mg²⁺, Na⁺ + K⁺ 以差

减法计算。 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 从碱度计算而得。 SO_4^{2-} 以铬酸钡容量法测定, Cl^- 以铬酸钾容量法测定。电导率用 Cole-parmer 电导仪测定, pH 值用 pHB-29C 酸度计测定。供组织学观察的鳃组织用 Bouin 氏液固定, 石蜡包埋, H-E 染色。

2 结果

2.1 低 pH 对鱼类胚胎的影响

2.1.1 低 pH 对三种家鱼胚胎的急性毒性 作者采用把生物死亡一半的 pH 水平称作半致死水平, 用 LL_{50} 表示。实验求得三种家鱼(鲢, 草, 鳙)胚胎发育阶段半致死水平 (LL_{50}) 于表 3。

表 3 低 pH 对鲢, 鳙和草鱼胚胎的毒性

Tab.3 The toxicity of low pH on embryos of silver, bighead carp and grass carp

试验材料 Test materials		LL ₅₀ (以pH 值计)			
		24h	48h	72h	96h
鲢鱼囊胚晚期 Blastula late stage of silver carp			5.7±0.1	5.9±0.1	6.0±0.1
鳙鱼囊胚中期 Blastula medium stage of bighead carp			5.6±0.1	5.9±0.1	6.0±0.1
草鱼 Grass carp	囊胚中期 Blastula medium stage	4.8±0.1	5.5±0.1	5.8±0.1	5.9±0.1
	原肠早期 Gastrula early stage	4.8±0.1	5.7±0.1	5.9±0.1	6.0±0.1

试验结果表明, 三种家鱼胚胎发育期间对低 pH 的敏感性相近, 没有明显的差异。当 $\text{pH} \leq 6.5$ 时, 受精卵的死亡率与对照组接近。但当 ≤ 6.0 时, 受精卵的死亡率与 pH 值有显著的相关性, 即随着 pH 值的降低, 死亡率显著升高, 全死亡时间显著缩短。白鲢的受精卵在 pH5.5, pH5.0 和 pH4.2 的试验组中, 分别于试验的第六天, 第四天和第二天全部死亡。草鱼受精卵在上述的三种 pH 水平中分别在试验的第三天, 第二天和第一天全部死亡。其中 pH4.2 组的受精卵在孵化之前就全部死亡。

2.1.2 低 pH 对泥鳅胚胎的毒性 试验求得了低 pH 对泥鳅胚胎 48h 和 96h 的死亡率, 结果于表 4。

2.1.3 低 pH 对孵化率的影响

由表 5 中可见, 低 pH 对三种鱼类的孵化率有明显的影响, 孵化率随着 pH 水平的降低而降低, 而且低 pH 会导致鱼苗孵化出膜过程的迟缓。

2.2 低 pH 对鱼苗的影响

表 4 低 pH 对泥鳅胚胎的毒性

Tab4 The toxicity of low pH on the embryos of loach

死亡率 Mortality (%)	pH					
		对照 Control	6.0	5.5	5.0	4.5
时间 Time						
48h		2	3	5	7	16
96h		3	4	6	8	36

表 5 低 pH 对鲢鱼胚、草鱼胚和泥鳅胚孵化率的影响

Tab.5 The effects of low pH on hatchability of embryos silver carp, bighead carp and loach

孵化率(%) Hatchability (%)	pH						
		对照 Control	6.5	6.0	5.5	5.0	4.5
试验材料 Test materials							
鲢鱼(受精后 43h, 水温 18—19℃) Silver carp (43h after fertilization, water T. 18—19℃)		80	58	42	38	34	
草鱼(受精后 26h, 水温 24℃) Grass carp (26h after fertilization, water T. 24℃)		86	59	17	5	2	
泥鳅(受精后 48h, 水温 21±1℃) Loach (48h after fertilization, water T. 21±1℃)		96	89	—	71	—	5

低 pH 对鲢鱼苗，鳙鱼苗，草鱼苗和泥鳅苗的毒性，结果于表 6。
由表 6 中可见，4 种鱼类对低 pH 的敏感性差异不大。

2.3 低 pH 对生长的影响

在低 pH 水平下，鱼胚和鱼苗的发育和生长明显滞缓，其孵出的鱼苗与水中的 pH 水平有显著的相关性，试验结果于表 7。

2.4 致畸影响

白鲢苗和泥鳅苗的畸形百分率随低 pH 水平变化的结果于表 8。
当 pH 为 5.0 时，孵出的鲢鱼苗和泥鳅苗的畸形百分率分别为 33% 和 28%，绝大多数畸形个体为背腹方向的弯体，腹部呈膨大状，少数畸形胚出现小头。

表 6 低 pH 对鲢鱼苗、鳙鱼苗、草鱼苗和泥鳅苗 96h 的 LL_{50} 值

Tab.6 The 96h LL_{50} of fry of silver carp, bighead carp grass carp and loach at low pH levels

试 验 材 料 Test materials	LL_{50} (以 pH 计)
白 鲢 鱼 苗 Fry of silver carp	5.0 (5.1—4.9)
鳙 鱼 苗 Fry of bighead carp	4.9 (5.0—4.8)
草 鱼 苗 Fry of grass carp	4.8 (4.9—4.7)
泥 鳅 苗 Fry of loach	4.7 (4.8—4.6)

表 7 低 pH 对几种淡水鱼生长的影响

Tab.7 Effects of growth on species species of freshwater fish at low pH

鱼 长 Fish length (mm) 鱼 Fish	pH						
		对照 Control	6.5	6.0	5.5	5.0	4.5
白鲢(10 天) Silver carp (10 day)		8.30 (8.20—8.46)	8.30 (8.17—8.43)	8.14 (7.98—8.30)	7.90 (7.67—8.31)		
草鱼(10 天) Grass carp(10 day)		10.10 (9.47—10.73)	9.42 (8.79—10.05)	8.87 (8.35—9.39)	8.49 (7.71—9.27)		
泥鳅(13 天) Loach (13 day)		4.15 (3.74—4.56)	4.07 (3.78—4.36)	4.23 (3.77—4.69)	3.90 (3.59—4.21)	3.87 (3.48—4.25)	3.26 (2.43—4.09)

2.5 低 pH 对鱼鳃的影响

在 pH 为 4.5 和 5.0 的试验水中，一些试验鱼的鳃盖周围被浓浓的一层粘液包裹着，鳃的颜色由鲜红变成浅白色。对鳃组织进行组织病理学方面的观察和检查，镜检结果于表 9。

2.6 铝在不同硬度和不同 pH 的试验水中对鱼的毒性

不同硬度的水中铝的毒性明显不同，在同一硬度的水中，不同 pH 水平中的铝，其毒性也不同，试验结果于表 10。

表 8 不同低 pH 水平下，鲢鱼苗和泥鳅苗的畸形百分率
Tab.8 Teratogenic percentage of fries of silver carp and loach at low pH level

试验材料 Test material	pH	对 照				
		Control	6.5	6.0	5.5	5.0
鲢鱼苗(受精后 72 小时, 水温 18—21℃) Silver carp fry (74h after fertilization, water T. 18—21℃)		5%	6%	10%	17%	33%
泥鳅苗(受精后 72 小时, 水温 20—22℃) Loach fry (72h after fertilization, water T. 20—22℃)		2%	4%	9%	12%	28%

表 9 低 pH 对鱼的鳃组织的影响
Tab.9 Effects of low pH on gills of fish

pH	症 状 Symptoms
4.5	鳃组织严重增生，部分鳃小片之间相互发生融合和粘连。
5.0	鳃上皮肿胀，部分鳃上皮出现脱裂现象。
5.5	鳃组织出现渗血。
6.0	鳃组织出现大量粘液，部分鳃小片发生弯曲和扭曲。
对照	鳃小片整齐排列，呈梳状形。

表 10 在不同硬度和不同 pH 水平下，铝对草鱼和泥鳅的毒性
Tab.10 The toxicity of Al on grass carp and loach at various hardness and pH levels

水 型 Water type		死亡率 (%) Mortality (%)	Al 浓度 (mg / L) Al	Concentration (mg / L)											
				0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	2.0	2.8	3.2	4.0	6.4	12.8	
		pH													
软水(草鱼苗, 4 天)		4.5		22.7	55.5	92.5	100								
Soft water (grass carp fry, 4 day)		5.0		7.5	12.5	87.5	100								
		5.5		4.0	8.0	14.5	31.8								
软水(草鱼种, 10 天)															
Soft water (grass carp fingerling, 10 day)		5.0						20	20	52.4	68.4	100			
泥鳅苗 (4 天) Loach fry (4 day)	很软水	5.0			0	5	95			100		100	100		
	Very soft water	5.5			0	5	15			100		100	100		
		6.0			0	5	9.5			100		100	100		
	软水	5.0			0	0	0			5		90	100		
	Soft water	5.5			0	0	0			0		90	100		
		6.0			0	0	0			0		80	100		

3 讨论

3.1 不同种类的鱼对低 pH 的敏感性是不同的。瑞典在 50 个被调查湖泊中发现下述的敏感性顺序: 斜齿鳊 > 鲦鱼 > 红点鲑 > 真鲷 > 白鲑 > 河鲈 > 狗鱼 > 鳗鲡。挪威的调查发现敏感性顺序为: 大西洋鲑 > 欧鲷 > 河鲈 > 鳗鲡^[1]。张礼善发现我国的经济鱼类对氢离子浓度的敏感性顺序为: 鲢 > 草 > 鳙 > 青 > 鲤^[12]。对氢离子浓度生存适应范围在 pH4.6—10.2, 迅速全致死水平为 pH4.0, 能引起存活率变化的 pH 间隔(0.2 个单位)等, 在家鱼中是相同的, 这说明了家鱼对低 pH 的敏感性差异是很小的。作者采用 96h 致死阈水平和半致死水平加以比较, 发现差异性也是不大。因此可以用家鱼中的一种(例如: 白鲢或草鱼)试验结果来确定安全的 pH 水平。

3.2 鱼胚和鱼苗阶段是鱼类生活周期中对低 pH 最为敏感而且最易死亡的阶段^[3, 13, 14]。Dahl 在 1927 年就发现卵黄囊发育阶段的鲱鱼在 pH4.7—5.4 和 pH5.1—5.7 时, 20 天内死亡率分别为 80% 和 10%, 卵黄囊阶段的鲑科鱼类 12 天的 pH 半致死水平为 4.5^[15]。Liloyd 和 Jordan 发现虹鳟仔鱼 15 天的半致死 pH 水平为 4.5, 8 天半的半致死水平为 4.2^[7]。Carter 发现河鲈仔鱼在 pH4.5 和 4.6 的水中半存活时间分别是 42h 和 61h^[11]。Ellis 发现金鱼在硬水中 96h 半致死水平为 4.0, 在软水里是 4.3^[16]。Lewis 和 Peters 发现 3.5cm 长的鲤鱼幼鱼在 pH4.9 的水中, 4h 内被杀死^[17]。作者测定的草鱼苗, 鲢鱼苗, 鳙鱼苗和泥鳅苗的 96h 的半致死 pH 水平分别为: 4.8, 5.0, 4.9 和 4.7, 对存活没有影响的 pH 下限都是在 5.5。这要比鲑鳟鱼类, 金鱼和鲤鱼都要敏感些。草、鲢、鳙和泥鳅的仔鱼与其受精卵相比, 对低 pH 的耐受性高 13—14 倍, 与其幼鱼相比, 其敏感性要高 9 倍(按氢离子浓度计), 成鱼的耐受性更高。对于多种鱼类, 若水中不含高浓度的毒性金属, pH5.0 左右的水质不会引起成鱼的急性死亡。因此在确定水体安全的 pH 值时, 必须以鱼类的早期生活阶段的试验结果为依据。

3.3 低 pH 水平下, 鱼的胚胎比仔鱼更敏感, 作者以 96h 半致死水平比较, 鱼的胚胎比仔鱼敏感 10 多倍, 不影响鱼苗存活的 pH 水平的下限为 5.5, 而不影响鱼胚存活的 pH 水平的下限为 6.0。这与胚胎对离子调节机制发育尚不完全, 矿物质贮藏少的缘故, 离子调节是一个能量消耗的过程, 这就造成了胚胎的易感性。Daye 相信, 鱼类的受精卵在低 pH 水中的死亡, 是由于表皮细胞被酸腐蚀, 干扰了离子调节和呼吸的结果^[18]。不同发育阶段的胚胎对酸性水的敏感性是不同的, 健康的发育只能在很窄的 pH 范围内实现。最敏感的阶段是眼色素期, 在这一时期的临界下限的 pH 为 6.0^[7]。而这一时间正是胚胎开始进行主动的离子吸收时间^[3]。

3.4 Peterson 等详细描述了低 pH 延迟大西洋鲑的孵化现象, 他发现在孵化前任何时候把受精卵转入低 pH 的水中, 就会延迟孵化, 当 pH 为 4.0 时则根本不能孵化^[9]。这与作者的观察结果相一致, 家鱼的受精卵孵化对 pH 值的要求更高, 正常的孵化应保持在 pH ≥ 6.5。低 pH 推迟受精卵的孵化这与孵化酶活性降低及胚体活动能力的减弱有关^[19]。孵化酶是各种蛋白水解酶的总合, 具有很强的 pH 依赖性^[10]。实验证明, 卵被置于低 pH 的水中, 卵周液的 pH 在数小时内就与外部 pH 达到平衡^[19, 20], 低 pH 抑制了孵化酶的活性, 这可能是孵化推迟或受阻的主要原因。Peterson 等研究证明, 当虹鳟卵周液 pH 值

降到5.2 时, 孵化酶活性降到最适速率的10%^[9]。另有报道, 鱼类胚胎在低pH 水中的活动性大为减弱, 不能有效地破膜而出^[13]。作者同样观察到, 在低 pH 水中活动极差的胚胎直到孵化出膜后仍不能伸直。胚体与对照组相比明显要小, 这说明在低 pH 水中的胚胎的整个发育过程都被推迟了。因为低 pH 能抑制胚胎的离子主动吸收, 使新陈代谢变慢^[20]。在低 pH 水中, 鱼的卵黄转为结构物质的比例较小, 许多营养物质被用于克服低 pH 压力所需的能量上, 因此胚胎的发育和生长变慢。

3.5 在低 pH 的水中, 鱼的离子交换和酸碱平衡紊乱, 以及鳃部粘液的过量分泌降低了氧越过鳃表面扩散速率, 这是酸性水中鱼类死亡的主要生理机制, 这种生理机制因不同的 pH 水平而异。当 pH4.0 — 5.0 时, 离子交换失常, 这也是致死的主要原因^[1]。而 pH4.0 以下, 鳃组织严重损伤, 妨碍气体交换, 使鱼窒息而死^[21]。

3.6 在酸沉降影响的流域中, 土壤中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Al^{3+} 交换了 H^+ , 使水中的 Al^{3+} 与 H^+ 成高度的正相关, 并且可能达到对水生生物的毒性水平 ($>0.2\text{mg/L}$)^[6]。铝的毒性除与浓度和价态有关外, 还取决于水中的 pH 值和硬度 (Ca^{2+} 含量)^[22]。试验结果表明, 草鱼苗在 pH5.0 的软水中, 致死阈浓度为 0.1mg/L , 96h 半致死浓度为 0.26mg/L 。泥鳅仔鱼在 pH5.0 左右的水中, 铝对它的毒性最大, 而且在很软的水 (Ca^{2+} 为 $87.3\mu\text{eq/L}$) 中, 铝的毒性明显地大于软水 (Ca^{2+} 为 $349\mu\text{eq/L}$)。由于 Ca^{2+} 具有如此重要的生物学特征, 因此在调查水体酸化时, 硬度是一个十分重要的水质参数。

参 考 文 献

- [1] Beamish R. Acidification of lakes in Canada by acid precipitation and the resulting effects on fishes. *Water, Air and Soil Pollution*, 1976, 6: 501—514.
- [2] Haines T A. Acid precipitation and its consequences for aquatic ecosystems: a review. *Trans. Amer. Fish. Soc.* 1981, 110: 669—707.
- [3] Jensen K, et al. Low pH levels wipe out salmon and trout population in southernmost Norway. *Ambio*. 1972, 1: 223—225.
- [4] 王德铭等. 酸雨与农业. 北京: 中国林业出版社, 1988: 74—78.
- [5] “酸雨”学术活动工作委员会. 关于控制酸雨对大农业危害发展的建议, 酸雨与农业. 中国林业出版社, 1989: 6—9.
- [6] Fivelstad S. et al. Aluminium toxicity to atlantic Salmon (*Salmo salar*) and brown trout (*Salmo trutta*): mortality and physiological response. *Rep. Inst. Freshw. Res. Drottningholm*, 1984, 61: 69—77.
- [7] Lloyd R, et al. Some factors affecting the resistance of rainbow trout (*Salmo gairdnerii* Richardson) to acid waters. *J. Air Wat. Pollut.* 1964, 8: 393—403.
- [8] 国家环保局. 渔业水质标准(试订). 水和废水监测分析方法(第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1989: 583—584.
- [9] Graham M S, et al. Toxicity of environmental acid to the rainbow trout: interaction of water hardness, acid type and exercise. *Can. J. Zool.* 1981, 59: 1518—1526.
- [10] Leivestad H. Acidification effects on freshwater fish. P. 84—92 In: Ecological impact of acid precipitation. proc. Int. Conf., Sandefjord, Norway 1980, Eds.: D. Drablos and A. Tollan. SNSF Project, Oslo—As.
- [11] Carter L. Effects of acidic and alkaline effluents on fish in sea water. *Eff. wat. Treat. J.* 1964, 4: 484—486.
- [12] 张礼善. 青、草、鲢、鳙、鲤对氢离子浓度的生存适应性. 水生生物集刊. 1960, 2: 134—142.
- [13] Carrick T. The effect of acid water on the hatching of salmonid eggs. *Journal of Fish Biology*, 1979, 14: 165—172.
- [14] Runn P, et al. Some effects of low pH on the hatchability of eggs of perch, *Perca fluviatilis*, *J. Zoon.* 1977, 5:

115—125.

- [15] Dahl K. The effects of acid water on trout fry. *salm. Trout Mag.* 1927, **46**: 35—43.
- [16] Ellis M M. Detection and measurement of stream pollution Bull. U. S. Dep. commerce. 1937.
- [17] Lewis W M. et al. Coal mine slag drainage. *Ind. wastes*, 1956, **1**: 145—146.
- [18] Daye P. The impact of acid precipitation on the physiology and toxicology of fish. *International Atlantic Salmon Foundation Special Publication*. 1981, **10**: 29—34.
- [19] Peterson P G D, et al. Inhibition of atlantic salmon (*Salmo salar*) hatching at low pH. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1980, **37**: 770—774.
- [20] Johanson N, et al. Perivelline pH of salmonid eggs in relation to ambient pH. *Wat. Res. Bull.* 1981, **17**(6): 994—999.
- [21] Robinson G D, et al. Difference in low pH tolerance among strains of brook trout (*Salvelinus fontinalis*). *Jour. Fish. Biol.* 1976, **8**: 5.
- [22] Baker J P, et al. Aluminim toxicity to fish in acidic waters. *Water, Air, and Soil Pollution*. 1982, **18**(1—3) : 289—309.

EFFECT OF ACID WATER ON SEVERAL MAJOR FRESHWATER FISHES

Zhang Fuying and Li Xinfu

(Institute of Hydrobiology, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072)

Abstract

Under laboratory conditions, the toxicity of acid water on several major freshwater fishes were studied. The results indicated that the H^+ concentration was correlated with the mortality of embryo and fry of these fishes. The development of embryo was postponed at lower pH levels. In order to keep fertilized eggs to hatch out normally, the pH level in water should be, at least, higher than 6.5. No significant difference in sensitivity was observed among the fishes tested. However, the sensitivity to pH of each fish species was distinct at different development stages. The sensitivity decreased as the fish developed. Pathological changes of lamellar epithelium were observed at pH 6.0. The toxicity of low pH and aluminium showed synergism and was affected significantly by hardness of water (or Ca^{2+} concentration). Moreover, the softer the water quality was, the more harmful the toxicity of H^+ and Al was.

Key words Acid water, Fish, Toxicity, pH, Sensitivity