

综 述

酸雨对水生态系统的影响

彭金良¹ 严国安¹ 沈国兴¹ 严 雪¹ 刘永定²

(1. 武汉大学环境科学与工程系, 武汉 430072; 2. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

EFFECT OF ACID RAIN ON AQUATIC ECOSYSTEM

PENG Jin- liang¹, YAN Guo- an¹, SHEN Guo- xing¹, YAN Xue¹ and LIU Yong- ding²

(1. Department of Environmental Sciences and Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072;

2. Institute of Hydrobiology, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072)

关键词: 酸雨; pH 值; 水体酸化; 水生态系统

Key words: Acid rain; pH; Water body acidification; Aquatic ecosystem

中图分类号: X826 文献标识码: A 文章编号: 1000- 3207(2001)03- 0282- 07

水体酸化是一个渐进而复杂的过程, 引起水体酸化的因素很多, 如酸沉降、工农业酸性废水的排放、有机物生化降解、不适当施肥产生的多余含氮化合物的氧化、森林砍伐和收获农作物(意味着从土壤中吸收盐基离子, 释放氢离子)等, 其中酸沉降是引起水体酸化的主要原因。

酸雨是酸沉降的主要形式。人类早在 19 世纪中叶就发现了“酸雨”, 但直到 20 世纪 60 年代以后随着酸雨污染范围不断扩大及其对生态系统影响的不断加剧, 有关酸雨的形成机理、危害及防治措施的研究才得到重视。酸雨导致水体酸化这种现象首先大范围的出现在瑞典和挪威, 之后又出现于美国和加拿大。当然, 酸沉降并不一定会导致水体酸化, 英国等一些欧洲国家、北美及我国重庆部分地区的酸沉降已有多年历史, 但大多数未受影响。因为酸雨是否引起水体酸化在很大程度上取决于水生态系统中各生态因子对酸沉降的缓冲能力, 水体在酸中和容量(ANC) 小于 200mg/L, 地表水碱度在 10mg/L CaCO₃ 以下时对酸沉降特别敏感^[1]。实际上并非所有的酸源都是人为的, 如空气中的 CO₂、水中细菌分解产生的 CO₂、腐烂树叶分解产生的腐殖酸、氮与含硫有机物氧化产生的强酸、亚硫酸铁氧化产生的硫酸和海盐等都会导致水体酸化。

1 酸雨导致水化学变化

水体酸化引起水体中一系列物理、化学和生物变化, 这些变化相互关联, 最终导致水

收稿日期: 1999- 07- 02; 修订日期: 2000- 03- 30

基金项目: 国家自然科学基金(39870152); 淡水生态及生物技术国家重点实验室开放基金项目资助

作者简介: 彭金良(1976—), 男, 浙江省龙游县人; 武汉大学环境科学与工程系 98 级研究生; 主要从事生态毒理学研究

中元素的含量、形态和生物有效性发生改变^[2]。在未酸化湖泊中, 碳酸氢根离子是决定水体酸中和容量的主要因素, 它对稳定水体 pH 起主导作用。但当酸雨的酸度太大时会破坏水体的缓冲平衡, 硫酸根离子成为主要的阴离子。同时水体中各种形态碳: POC、DOC、PIC、DIC 在酸化水体中的含量均低于非酸化水体, 水体中的营养物质组成从而发生改变。而 NO_3^- 在水体酸化过程中的作用也呈上升趋势, 它导致水体 pH 降低并使水体中其他形态氮(如溶解有机氮、颗粒有机氮、 NO_2^- 等)浓度降低, 改变了氮元素的生物可利用性。此外, 工业排放的 NH_3 经与土壤的质子交换、植物吸收、硝化等作用被转变成 NO_2^- 和 NO_3^- , 并释放 H^+ ^[3] 而影响水体的酸化程度。

酸度可以通过三种机制改变金属的形态和分布: ①酸度可改变金属的水解平衡, 从而改变游离金属离子的浓度; ② H^+ 与金属离子对有机或无机物质的竞争结合, 改变其络合平衡; ③酸度还可影响金属离子吸附过程中金属氢氧化物的共沉淀、生物表面吸附等。酸化环境中铝含量的增加被普遍认为是生物受水体酸化危害的重要原因之一^[4], 铝的存在形态决定着水体中铝的浓度和毒性, 一般认为有机螯合铝没有毒性, 有毒的是无机铝^[5]。随着 pH 值的降低, Al^{3+} 占总单核铝的百分比逐渐升高^[6], 加上水体酸化引起底部於泥对铝的释放, 导致水体中的 Al^{3+} 浓度升高, 毒性变大。

钙在水体中的浓度亦受多种因素的影响。酸雨对土壤的淋溶、 H^+ 与 CaCO_3 的反应均会使 Ca^{2+} 浓度升高。 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 及痕量元素 Pb 、 Cu 、 Zn 、 Be 、 Cd 、 As 、 Mn 、 F 和 Fe 都随系统 pH 值降低而增加。它们的溶出量与溶出顺序与土壤组成的各种因素有关, 其原因是质子活性和溶解态铝浓度的增加, 竞争性占据了这些元素在土壤表面的吸附位置, 同时 H^+ 活性的增强也降低了吸附物的负电荷。

2 水体酸化对水生生物的生态效应及其作用机制

酸性降水引起的天然水体酸化改变了水体 pH 值及水体水化学状况, 其对各种水生生物类群影响取决于介质 pH 的降低程度、离子及难降解物的毒性等^[7]。研究表明, 水体 pH 降低可改变微生物的组成和代谢活性、毒害藻类、水生维管植物、浮游动物、软体动物、鱼和两栖动物等, 从酸化的湖泊或溪流摄取食物和水的鸟类和哺乳动物可能也会遭受食物短缺和有毒金属的危害^[8]。八十年代后期国内外都有从不同方面就水体酸化对水生生物影响的总结报道^[9, 10], 本文主要从生理毒害方面对近几年的研究略加总结。

2.1 水体酸化对微生物和藻类的影响

大部分微生物生活在中性或微偏酸、偏碱的环境中, pH 对微生物生命活动的影响主要有以下三方面: ①引起细胞膜电荷的变化, 从而影响微生物对营养物质的吸收; ②影响微生物代谢过程中酶的活性; ③改变水环境中营养物质的可利用性及有害物质的毒性。虽然在 pH 变化的情况下微生物能通过合成一定的氨基酸脱羧酶或氨基酸脱氨酶, 催化部分氨基酸分解生成有机氨或有机酸, 暂时缓冲一下体内 pH 变化, 但持续较低的 pH 将使微生物的生长受到抑制, 甚至引起机体死亡。因各种微生物的最适合 pH 不同, 水体酸化后的微生物区系以霉菌占优势, 真菌在沉积物中数量增加^[11, 12], 即酸化水体中, 细菌通常为真菌所取代。

藻类是水生态系统的初级生产者。水体的酸化对藻类生长繁殖的影响很大, 主要表现为藻类生长潜力减弱, 其原因之一是水体酸化大大降低了磷的生物有效性^[13], 从而导致淡水贫营养化。同时藻类的群落结构、细胞密度、生化成份含量、叶绿素含量、细胞生理状态都发生变化, 甚至连 DNA、ATP 亦受影响。在 pH 4.5 时藻类细胞内含物变粗、细胞壁增厚, 出现细胞老化现象^[14]。

2.2 水体酸化对浮游动物和软体动物的影响

浮游动物, 如甲壳纲和轮虫纲对水体酸化的反应非常明显, 低 pH 对浮游动物毒性效应机理可能是在低 pH 胁迫下, 浮游动物的膜通透性增大, 心肌肿胀, 血红蛋白迅速凋谢, Na^+ 和 Cl^- 出现净流失等^[15]。使其存活率、繁殖、离子调控、呼吸、心率、生长及食物都受到影晌, 种类和密度逐渐减小, 生物简单化^[16]。pH 低于 5.5 时对浮游动物繁殖及生理的不利影响更甚。

腹足纲、双壳纲等软体动物的消失首先说明了湖泊的酸化。在斯堪的纳维亚湖群, pH 值为 5.2—4.4 之间的湖泊中没有发现腹足类。这是因为软体动物的耐受性、存活、生长及繁殖均受到影晌^[17]。它们在其贝壳形成过程中需要大量碳酸钙、磷酸钙及碳酸镁, 湖泊酸化使 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 大量流失, 导致其对钙的同化作用受到影晌。同时细菌活动减弱, 有机物未经分解便沉于湖底, 水质趋向贫营养化, 致使贝壳变薄, CaCO_3 构成粗糙, 粘合松脆, 易破坏。而产卵量的变化比螺壳大小和结构的变化更敏感。另外低 pH 时藻类密度下降导致饵料不足也是影响软体动物发育的原因之一。

2.3 水体酸化对鱼类的影响

在酸性水体中, 低 pH 毒性的靶器官之一是感觉器官, 如味觉和嗅觉器官^[18]。与生物活动相关的化学信号可能在酸性水体中被掩饰或抵消, 或这些器官的结构和生理功能直接受到破坏, 干扰了与化学感受器相联系的规避和逃亡反应, 群体交流出现障碍, 寻找食物的能力下降, 使其生存能力减弱。

低 pH 对鱼类的生理损害主要表现为: (1) 阻碍鳃的气体交换和血氧运输; (2) 导致渗透压调节机制失调; (3) 血酸离子调节机制的丧失及血液酸碱平衡紊乱^[19—21]。研究表明, 鳃受酸化水体刺激导致鳃组织损伤, 鳃小片弯曲并融合, 鳃上皮肿胀、渗血, 鳃上皮细胞肥大、增生, 粘液大量分泌, 而这些均可导致鳃部的血氧交换困难。而鳃表面微环境的 pH 比水中的高也会导致氧摄取的减少, 因此组织缺氧可能是极端 pH 下鱼死亡的主要原因之一。酸性水体中的 H^+ 对鳃有高渗透性, 它通过鳃上皮大量进入体液^[4], 改变血液的化学组成, 使血球比容升高, 体内水份在细胞内外重新分配, 血液粘滞性增大^[22]。而且过多的 H^+ 导致 HCO_3^- 的丧失将直接促进鱼的败血症的形成, 血红蛋白在缓冲细胞外酸负荷作用降低^[23]。同时低 pH 对鳃 Na^+/H^+ 和 $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ 对应离子交换机能产生干扰, 随着 pH 下降, Na^+ 损失增多, 在 pH 4.0 时 Na^+ 流出量比正常的约高 10 倍, 体液 Cl^- 的损失, 至少在 pH 4.0 时与 Na^+ 一样严重。离子的耗尽使血液的粘度明显增大从而导致循环崩溃亦是鱼死亡的原因之一。另外钙离子也控制着鱼鳃对钠和氢离子的渗透性, 低钙水平能引起血液盐含量降低, 鱼换气过度和血液氧含量下降。

鱼在低 pH 胁迫下肾间组织增生肥大, 细胞核径增加, 血浆甲状腺素和三碘甲状腺氨酸的比率增大^[24], 血浆中的皮质醇(素)也增高, 它刺激鳃上皮细胞增殖与分化。虽

然皮质醇在机体抵抗酸性水中起重要作用, 但长期较高浓度的皮质醇对免疫系统有负面影响, 这种生理压力和免疫能力的降低可能会导致鱼的高死亡率^[25]。低 pH 亦影响鱼的繁殖和生长。使鱼的产卵量下降, 受精卵因离子调节机制发育尚不完全或被破坏而死亡^[26, 27], 其孵化成功率也因低 pH 导致的孵化酶合成及活性的降低而降低^[28]。仔鱼的体长也与水体 pH 有明显的相关性, 其原因是低 pH 抑制了胚胎的离子主动吸收, 使新陈代谢变慢^[20], 卵黄转变为结构物质的比例减小, 许多营养物质被用于克服低 pH 压力所需的能量上, 胚胎活动减弱致使胚胎生长缓慢, 不能有效破膜而出, 且畸形率较高^[20, 21, 29]。

2.4 水体酸化对水禽类的影响

淡水酸化对于河流和湖泊中生存的禽类具有负作用。在酸化水体中, 昆虫较多, 几乎没有鱼, 这种环境适宜于雏鸟的生长, 但对于大禽如秋沙鸭、潜鸟的成体来说其食物是不够的。而且在酸性栖息地, 水禽食物中重金属含量很高, 而钙含量较低, 影响了卵壳的形成, 钙和磷的同化吸收和骨骼的矿物化^[30], 破坏了其繁殖过程, 使其繁殖成功率远低于高 pH 栖息地。

3 低 pH 与污染物对水生生物的生态毒理学效应

3.1 低 pH 及铝对水生生物的复合毒性效应

铝离子在低 pH 下对浮游植物、浮游动物的毒性研究已有大量报道。有人研究得出浮游植物和浮游动物与铝的形态之间的关系可由以下模式描述: $y = a - b \log x$ 及 $y = ae^{-bx}$, 其中 y 为藻细胞密度(100 个/L)和浮游动物密度(个/L), x 为 AlF^{2+} 、 AlF_2^+ 、 AlF_3 或 Al(OH)^{2+} 的浓度(以 Al 计 mg/L)。可见铝离子浓度的升高也会降低酸化水体中浮游植物和浮游动物的数量。

水体 pH 降低到还不足以杀死鱼类时, 铝的毒性就会使鱼大批死亡。一般认为铝在低 pH 下对鱼的毒性机理是: (1) 呼吸的干扰, 主要是由于铝在鳃片粘液上的沉淀及与负电荷功能基团的结合导致鳃片粘液的阻塞及膜流动性的降低, 使氧的摄取减少; (2) 离子渗透调控的破坏, 铝结合到鳃表面导致鳃对 Na^+ 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 的吸收减少而丢失增加, 干扰了跨细胞扩散和主动运输, 从而造成了离子调控和渗透调节障碍; (3) 循环的干扰, 由于减少了血浆容量, 红血球膨胀及血液粘性的提高导致了很高的血细胞容量, 造成养分和氧气运输困难^[31, 32]。另外, 铝与 ATP 结合形成牢固复合物的能力比 Mg^{2+} 强, 从而影响许多酶的活性, 且可能干扰细胞的能量代谢。铝还可结合到钙调蛋白上, 控制一系列的细胞反应, 包括调控许多酶的合成与活性。

铝和低 pH 亦可干扰鱼体无机物的组成和骨骼的钙化。铝与低 pH 起联合作用, 对各器官钙离子吸收和积累有着更明显的抑制作用, 这是因为高浓度的 H^+ 使体内外电位平衡发生移动, 钙离子从体外向体内的主动运输受到抑制, 同时低 pH 和高 Al^{3+} 损伤鳃片, 削弱了鳃的离子转换能力, 导致鳃和皮肤对钙的吸收减弱^[33, 34]。钙吸收的抑制导致钙积累的减小, 影响了体内钙离子的代谢和转化, 这对鱼体的代谢及生长所产生的潜在危害很大。若水中 Ca^{2+} 浓度在 100 $\mu\text{g}/\text{L}$ 以下时则 Ca^{2+} 对鱼类存活的影响比低 pH 的影响还大。而钙浓度的降低也减少了对铝离子毒性的缓冲作用。

3.2 低 pH 下有机污染物对水生生物的毒性效应

大部分有机污染物在 pH 值降低时对水生生物的毒害加大, 其主要机理是随着 pH 值的降低, 低等电点的有机物以分子态存在, 而这种非离子态的有机化合物更易穿透生物膜进入机体并与体内亲核成分如蛋白质、酶、DNA 等发生亲电作用, 而破坏机体的正常新陈代谢^[35]。另外低 pH 使膜内外的 $[H^+]$ 梯度遭破坏, 膜的通透性和流动性发生改变, ATP 合成受阻, 携带质子的有机物更容易透过生物膜, 并与机体靶位发生强烈的不可逆键合(如形成氢键), 从而大大增强毒性^[36]。

3.3 低 pH 下重金属对水生生物的毒性效应

酸雨对土壤中重金属的淋溶及 H^+ 对水底腐殖酸上重金属的竞争吸附使酸化水体中重金属如 Hg、Cd、Pb、Cu、Zn、Be、Fe 的含量升高, 它们因对生物体穿透力的升高, 生物可利用性大大增强而表现出更高的毒性。早期研究就发现低 pH 水中鱼体内有较高浓度的 Hg, 其浓度与 pH 具负相关性($r = -0.93, p = 0.002$)^[37,38], 即便是最普通的铁离子, 总铁浓度的升高和 pH 的降低在降低七鳃鳗孵化成功率的作用上较铝浓度的变化更为明显。重金属离子还可通过饮水、捕食或其他吸收过程在生物体内逐级累积, 最终造成生物毒害和水生态系统的破坏。

4 水体酸化对水生态系统结构与功能的影响

水体酸化及其所导致的水化学改变都会影响水生生物, 使其生物多样性下降, 结构简单化, 食物链和种间关系遭到破坏。一般当水体 $pH < 6.5$ 时, 水体酸化对生物影响已经开始显示出来。随着水体酸化程度的加大, 表现出来的对水生态系统的影响也越明显。

在弱酸化($pH < 6.0$)水体中, 因 pH 降低及其带来的其他种群的改变和营养循环降低, 再加上嗜酸碱性不同, 导致藻类种群的变化^[9]。藻类的多样性与 pH 值密切相关($r = 0.8814$), 在 $pH < 3.5$ 的水体中多样性指数 $d < 1$, 而 $pH > 5.5$ 的水体和正常水体中 d 均在 1.5 以上^[14,27]。藻类总数量锐减, 分别为轻度酸化和正常水体的 62.5% 和 58.12%^[39], 而藻类生物量受的影响比对细胞密度的影响更甚。浮游动物的种类数(Y)与 pH 值(X)的回归方程为 $Y = 1.520X - 2.488$, 数量较正常水体中下降了 34—67%^[40]。加拿大的湖泊调查发现 pH 在 5.0 以上时, 浮游动物有 9—16 种, pH 在 5.0 以下时仅为 1—7 种^[9]。水体中底栖动物的密度, 生长量也与 pH 值均呈负相关, 多样性指数较正常的低^[41]。水环境酸度的增加也使鱼类的多样性下降, 种类的数量减少, 丰度降低, 补充群体衰退, 肥满度和生长下降。另外, 水体 pH 降低亦影响到两栖类、水禽类的组成和数量。

在酸化水体中因生物种类和数量及营养成份的生物有效性都发生变化, 加之其产生的次生效应等都会使整个水生态系统的物质循环和能量流动受到干扰^[21], 生态系统的稳定性也遭受破坏。如作为分解者的微生物由于低 pH 导致腐生微生物的死亡, 正常分解被迫停止, 有机物质开始在湖中积累, 构成新生命所需的营养元素缺乏来源, 同时真菌有时会在湖底形成一层深色的垫子而将湖底封闭, 从而阻塞营养物质进入水中, 没有营养物质的连续供应, 大量绿色植物必将死亡、消失。而作为水体主要生产者的浮游植物特别是藻类, 因受微生物分解能力降低而产生的营养物质吸收受阻及酸性湖泊磷输入的减少而产生对磷的利用能力减弱的影响, 其生产力下降, 使无机养料不能进入生物循环当中, 更

不能利用太阳能进行能量固定。与此同时, 大型水生植物的群落组成和生产力大幅度下降、食物链中最基本的食草动物被毁、甲壳动物消失、软体动物受损、鱼类和啮齿目减少。这种物质与能量流动的中断使正常的食物链(网)无法维持而导致该生态系统的破坏。另外, 鱼的中毒或死亡将产生对以它为食物的大型禽类及人类的生态效应, 造成水禽的减少及对人类健康的影响。

正因为酸雨对整个生态系统及人类自身有如此巨大的影响, 对消减酸雨造成水体酸化的影响及酸化水体的生态恢复和水生态系统的重建工作在不断的进行, 且已取得相当成就, 但仍有许多工作有待进一步深入: (1) 我国各地地质、地貌情况差别很大, 导致水体酸化原因很多, 应继续加强对全国范围内水体酸化成因的调查及酸雨与当地特殊地质条件及周围环境相互作用的分析, 确定其缓冲容量、相对敏感性及地理分布, 建立评价水体酸化敏感性的有效方法; (2) 现在对鱼类特别是四大家鱼受酸雨影响的生理生化机制研究的较为深入, 但对水体中的微生物、藻类、水生维管植物、浮游动物等还只是停留在多样性的变化和优势种群的变动, 以后应加大对内部深层机制的研究; (3) 应加强酸化水体对珍稀、濒危水生动植物影响的研究, 为物种多样性的保护提供理论依据; (4) 加强酸化水体中食物链(网)的变化即不同营养水平的水生生物相互关系的研究, 以正确指导农业和渔业合理有效的进行; (5) 加强对酸化水体的恢复及水生态系统重建的工作。

参考文献:

- [1] Haines T A. Acidic precipitation and its consequence for aquatic ecosystems: A Review [J]. *Trans Amer Fish Béliae Soc.*, 1987, **110**: 669—707
- [2] Penttinen O P, et al. Chlorophenols in aquatic environments: structure—activity correlation [J]. *Ann Zool Fennici.*, 1995, **32**: 287—294
- [3] Galloway J N. Acid deposition perspectives in time and space [J]. *Water Air Soil Pollut.*, 1995, **85**: 15—24
- [4] Myllynen K, et al. River water with high ion concentration and low pH causes mortality of lamprey roe and newly hatched larvae [J]. *Ecotox Environ Saf.*, 1997, **36**: 43—48
- [5] Driscoll C T, et al. Effect of aluminium speciation on fish in dilute acidified water [J]. *Nature*, 1980, **284**: 161—164
- [6] 徐仁扣. pH 对酸性土壤中铝的溶出和铝离子形态分布的影响 [J]. 土壤学报, 1998, **35**(2): 162—170
- [7] Stokes P M. Ecological effects of acidification on primary producers in aquatic systems [J]. *Water Air Soil Pollut.*, 1986, **30**(1—2): 421
- [8] 杜宇国. 酸雨的生态影响及防治对策 [J]. 生态学杂志, 1992, **11**(6): 51—54
- [9] 王德铭. 酸雨对水生生物影响的研究 [J]. 生态学报, 1989, **9**(1): 77—83
- [10] Schindler D W. Effects of acid rain on freshwater ecosystems [J]. *Science*, 1988, **239**: 149—151
- [11] Freda J. The effects of alumina and other metals on amphibians [J]. *Environ Pollut.*, 1991, **71**(2—4): 305
- [12] Spry D J, et al. Metal bioavailability and toxicity to fish in low—alkalinity lakes: A critical review [J]. *Environ Pollut.*, 1991, **71**(2—4): 243
- [13] Yan N D. Phytoplankton community of an acidified, heavy metal—contaminated lake near sunbury: Ontario: 1973—1977 [J]. *Water Air Soil Pollut.*, 1979, **11**: 43—55
- [14] 王德铭. 水质酸化对水生生物影响的研究 [J]. 环境科学学报, 1992, **12**(1): 91—95
- [15] Havas M, et al. Response of zooplankton, benthos, and fish to acidification: A n overview [J]. *Water Air Soil Pollut.*, 1995, **85**: 51—62
- [16] 夏宜. 酸雨、水体酸化及其对水生生物的影响 [J]. 重庆环境科学, 1996, **18**(3): 34—37
- [17] 刘保元. 酸性水对淡水螺类存活、生长与繁殖的影响 [J]. 应用生态学报, 1993, **4**(3): 313—318

- [18] Lemly A D et al. Effects of acute exposure to acidified water on the behavioral response of fathead minnows, *pimephales promelas*, to chemical feeding stimuli [J]. *Aquat Toxicol*, 1985, **6**(1): 25—36
- [19] 余日清. 低 pH 对草鱼血液酸碱平衡的影响 [J]. 环境科学学报, 1992, **12**(1): 112—118
- [20] 张甫英. 低 pH 对鱼类胚胎发育、鱼苗生长及鳃组织损伤影响的研究 [J]. 水生生物学报, 1992, **16**(2): 175—182
- [21] 余日清, 等. 低 pH 对草鱼呼吸活动和耗氧代谢的影响 [J]. 环境科学学报, 1992, **12**(1): 104—111
- [22] Milligan C L et al. Disturbances in haematology, fluid volume distribution and circulatory function associated with low environmental pH in the rainbow trout, *Salmon gairdneri* [J]. *J Exp Biol*, 1985, **99**: 397—415
- [23] Mattsoff L. Effects of external acidification on blood acid base status and ion concentrations of lamprey [J]. *J Exp Biol*, 1988, **136**: 691—703
- [24] Graham M S et al. Toxicity of environmental acid to the rainbow trout: interaction of water hardness, acid type and exercise [J]. *Can J Zool*, 1981, **59**: 1518—1526
- [25] Rosseland B O, et al. Physiological mechanisms for toxic effects and resistance to acid water: An ecophysiological and ecotoxicological approach, In: Acidification of Freshwater Ecosystem: Implication for the Nature. John Wiley Sons. Ltd, 1994, 227—246
- [26] 张甫英. 酸性水对几种主要淡水鱼类的影响 [J]. 水生生物学报, 1997, **21**(1): 40—48
- [27] 李辛夫. 低 pH 和铝对几种淡水鱼类早期生活阶段的影响 [J]. 环境科学学报, 1992, **12**(1): 98—104
- [28] Daye P. The impact of acid precipitation on the physiology and toxicology of fish. International Atlantic Salmon foundation special publication, 1981, **10**: 29—34
- [29] Peterson P G D et al. Inhibition of atlantic salmon (*Salmo salar*) hatching at low pH [J]. *Can J Fish Aquat Sci*, 1988, **37**: 770—774
- [30] Capdevieille M C et al. Aluminum and acid effects on calcium and phosphorus Metabolism in Young chickens (*Gaous gallus domesticus*) and Mallard Ducks (*Anas platyrhynchos*) [J]. *Arch Environ Contam Toxicol*, 1998, **35**: 82—88
- [31] Exley C et al. A mechanism for acute aluminum toxicity in fish [J]. *J Theor Biol*, 1991, **151**: 417—428
- [32] McDonald D G et al. Branchial mechanisms of acclimation to metals in freshwater fish. In: (Rankin J C and Jersén F B eds) Fish Physiology [M]. London: Chapman & Hall 1992, 297—321
- [33] 孔繁翔. 低 pH 值及铝对泥鳅吸收⁴⁵Ca 的影响 [J]. 环境科学, 1996, **17**(6): 57—59
- [34] 金洪钧. 酸性水和投加铝、钙对鲢鱼早期发育和鳃超微结构的影响 [J]. 应用生态学报, 1992, **3**: 67—75
- [35] Veith G D et al. A QSAR approach for estimating the aquatic toxicity of soft electrophiles [J]. *Quant Struct Act Relat*, 1993, **12**: 349—356
- [36] Saarikoski J et al. Factors affecting the absorption of phenolics and carboxylic acids in the guppy [J]. *Ecotox Environ Saf.*, 1986, **11**: 158—173
- [37] Andersson P. Mercury in fish muscle in acidified and limed lakes [J]. *Water Air Soil Pollut.*, 1995, **80**: 889—892
- [38] Haines T A. Lake acidity and mercury content of fish in Darwin National Reserve. Russia [J]. *Environ Pollut.*, 1992, **78**: 107—112
- [39] 况琪军. 酸化水体中的藻类研究 [J]. 中国环境科学, 1994, **14**(5): 350—354
- [40] 况琪军. 重庆地区酸化水体中的浮游生物 [J]. 重庆环境科学, 1994, **16**(5): 16—18
- [41] 刘保元. 重庆地区水体酸化对底栖动物的影响 [J]. 水生生物学报, 1995, **19**(增刊): 137—143