

## 酸雨对水生生物影响的研究

王德铭 李辛夫 庄德辉 刘保元

(中国科学院水生生物研究所, 武汉)

## 摘 要

环境生物学家目前面临的任务之一是就酸雨对水体和水生生物的冲击作出预测。本文主要介绍酸雨分布最广、危害严重的地区, 并对水生生物的影响作出分析。研究表明一个湖泊及其流域中和酸雨所进入的酸的容量, 主要取决于汇水区基岩的组成。湖、河酸化所带来的最明显的生物学冲击是鱼类种群的消失或减少。而食物网中各个营养级的生物也可能受到影响, 生物的数量和种类会减少, 结果随着整个水生生态系统的破坏, 水体的初级生产力和分解作用受到伤害。

我们所进行的研究表明: 鲢、鳙、鲤对酸的相对敏感性是受精卵 > 鱼苗 > 鱼种; 鲢鱼的96小时 $LC_{50}$ 分别是 $pH_{5.34}$ ,  $4.51$ 及 $3.80$ 。酸雨对大型蚤的急性毒性, 24小时 $LC_{50}$ 是 $pH_{4.66 \pm 0.19}$ ; 48小时 $LC_{50}$ 是 $pH_{4.94 \pm 0.20}$ 。椭圆萝卜螺对酸的96小时累积死亡率分别是:  $pH_{3.6}$ 时100%,  $pH_{3.8}$ 时60%,  $pH_{4.0}$ 时20%以及 $pH_{4.2}$ 时10%。

作者对今后需要进行的研究课题提出了建议。

**关键词:** 酸雨, 酸化, 水域, 水生生态系统, 影响。

酸性降水引起的淡水湖泊和河流酸度增加, 目前已是北欧和北美水生生态系统的主要环境问题, 因而受到环境科学工作者的极大重视。多年来国内外开展了大量的工作, 并已积累了较为丰富的资料。然而由于酸雨的环境效应和生物系统本身的复杂性, 科学界对水生生态系统正在和潜在影响的认识还有相当大的局限性, 在许多方面有待于进一步深化。

## 水 体 的 酸 化

酸雨降落在江河湖泊及其周围的广大汇水区, 除一部分被土壤和植被截留吸收外, 其余的汇成地表径流注入水体。多数水体都具有缓冲中和酸类的能力, 因此有酸雨的地区, 河、湖未必很快被酸化。但对某些地区的某些水体, 例如软水湖泊和小河, 缓冲能力较差, 酸雨有可能相当大地改变其 $pH$ 值和水化学性质。酸雨会使湖泊的 $pH$ 值一直降到5.0以下。在这样的湖泊中, 一般不会有鱼类, 水生生态系统也极端简单化<sup>[1]</sup>。即使是 $pH$ 值为6.5—5.0的弱酸性状态, 对水生生物也是不利的。国内外研究表明, 当 $pH_{6.5}$ — $6.0$ 时, 鱼卵孵化率明显下降,  $pH_{6.0}$ — $5.0$ 时, 鱼苗成活率下降, 生长缓慢,  $pH_{5.0}$ 以下, 鱼类的生殖功能失常, 大多数鱼类将绝迹<sup>[1]</sup>。

水体的缓冲能力取决于各种因素: 流域的土壤厚度、结构、化学性质; 下伏基岩的种类、植被, 水体的面积和水量, 水体碱度等<sup>[2]</sup>。在以石灰岩作主要基岩的地区, 水体的缓冲能力往往较强, 对酸雨不敏感。在分布有花岗岩, 某些片麻岩, 石英岩, 砂岩等硅质基岩, 土壤的盐基饱和度低, 土层又比较薄的地区, 可能成为酸雨的高度敏感区<sup>[3]</sup>。例如北欧北美就是这样的地区。在北欧三国以及苏格兰、美国、加拿大等许多地区, 大量湖泊和河流酸化, 水生生物群落发生了显著变化。据调查, 加拿大70多万个湖泊中有半数碱度低于 $50\mu eq/L$ , 15万个湖泊 $pH$ 低于6, 有14000个湖泊的 $pH$ 值低于4.7。根据已建立的模式预测, 按目前酸雨发展状况, 最终会有9%的湖泊 $pH$ 值低于5.0<sup>[4]</sup>。加拿大还对46个湖泊的 $pH$ 值历史性资料进行了对比, 发现这些湖泊 $pH$ 值平均每年下降0.16个单位<sup>[5]</sup>。在美国东北部849个湖泊中,  $pH$ 值小于5的有

本文于1988年5月31日收到。

212个, pH值在5—6之间的也有256个, 其中至少有113个湖泊已经完全没有鱼类<sup>[11]</sup>。另据估算, 仅斯堪的纳维亚、截至八十年代初, 就有大约1万个湖泊无鱼, 另有1万个湖泊已受到严重威胁。据预测, 到本世纪末, 该地区还会有大约2万个湖泊将受到酸雨的严重影响<sup>[11]</sup>。瑞典的9万个湖泊中至少已有18000个受到酸化。自三十年代以来, 湖泊的pH值已下降1.8个单位, 并有9万公里的江河受到酸雨的影响<sup>[6]</sup>。挪威对南部的115个湖泊进行调查, 发现pH值通常都在5.5以下。处于花岗岩地带, 流量超过300m<sup>3</sup>/秒的大河Tovdal河也已受到酸雨影响<sup>[7]</sup>。荷兰经过调查, 也发现90%的软水湖泊已经酸化, 其中35%的pH值低于4.0<sup>[8]</sup>。

酸性降水和集水区内的降水径流也显著改变湖泊的水化学特征。除硫在底部积聚外, 还有营养元素的输入产生的肥料效应, 有害金属阳离子的输入产生毒害作用。挪威、瑞典和加拿大的调查表明, 受酸雨影响的水体一般重金属浓度都高, 铝、锰、锌、铅、铜、镉、镍均高于不受酸雨影响的湖泊。其中特别是铝, 常可达到200μg/l以上的水平, 这样的浓度对鱼类有急性致死的毒性<sup>[9-10]</sup>。铝和其它重金属浓度的提高是由于流域土壤pH值的下降, 增加了金属的淋溶量, 因此在酸化水体中, 过量氢离子和活性铝是水生生物致毒的两个主要因素。由此可见, 不能孤立地研究水生态系统, 需要与陆地生态系统结合起来考虑。

水体的酸化是一个渐进的缓慢过程, 一般需要几年到几十年的时间。不过, 水体一旦被酸化, 后果十分严重。因为它几乎是无法治理的, 不但恢复过程十分缓慢, 而且水生态系统的重建更要慢得多。

### 酸雨对水生生物的影响

作为水生态系统中生产者之一的高等水生植物, 受酸雨的影响十分明显。在pH5左右的湖泊中, 泥炭藓(*Sphagnum*)成了优势种群, 成丛铺满湖底, 其它的高等水生植物都消失了, 这是因为在这样的酸性湖泊中, 可利用的无机碳几乎全是二氧化碳和碳酸, 有利于需要大量吸收游离二氧化碳的泥炭藓的生长<sup>[12]</sup>。同时这种植物又有较高的离子交换能力, 把其它植物可利用的离子都吸收了, 因此抑制了其它植物的生长<sup>[11]</sup>。由于泥炭藓的稠密生长, 还形成了一种许多底栖动物不能适应的群落生境, 从而影响了水生态系统的动态平衡。藻类是水体中的重要生产者。湖泊中pH为6以上时, 浮游植物种群正常。随着pH值降低, 种群发生变化。在北欧和北美的酸性湖泊中, 包括裸甲藻科(*Gymnodiniaceae*), 薄甲藻科(*Glenodiniaceae*), 多甲藻科(*Peridiniaceae*)及角甲藻科(*Ceratiaceae*)的甲藻门(*Pyrrophyta*)成为优势种群, 而蓝藻门(*Cyanophyta*)、金藻门(*Chrysophyta*)及绿藻门(*Chlorophyta*)却大大减少<sup>[11]</sup>。发生这种变化的原因是多方面的。藻类对低pH值的耐受性差异只是原因之一, 另外有一些底栖动物和浮游生物因低pH而数量减少或消失, 减少了对某些藻类的吞食, 还有耐酸藻类可利用的营养物质相对增加, 微生物分解营养物质的能力受到抑制, 使营养循环降低等, 都是变化的间接因素。瑞典对Gaardsjoen湖的研究表明, 酸性湖泊由于磷的输入减少, 藻类对磷的利用能力削弱, 生产的生物量减少, 湖泊的初级生产力降低<sup>[13]</sup>。北美及欧洲的酸化湖藻中还发现沉积物中硅藻种群数量增加<sup>[14]</sup>。

细菌和真菌是生态系统中的分解者及转变者。在加拿大Sudbury附近的湖群中, pH5.5是需氧异养菌的临界点。异养菌在酸化湖泊中的数量常比正常湖泊降低两个数量级, 即前者每毫升含细菌10<sup>4</sup>个, 后者为10<sup>2</sup>个<sup>[15]</sup>。另据实验观察, 湖水低于pH5时, 硝化过程减缓, 氨的氧化停止, 分解率降低。pH低于4时, 真菌数量增加<sup>[1]</sup>。酸化湖泊中, 嗜酸的硫氧化菌大大增加, 而不嗜酸的硫氧化菌、大肠菌群、硫酸盐还原菌和需氧异养菌稀少, 氧化氮细菌绝迹。以上变化将大大加速水体的贫营养化<sup>[16]</sup>。

水生态系统中的消费者可分为初级、二级或更高等级。浮游动物和底栖无脊椎动物在其中起着有机物转化和鱼类生产的基础作用。在酸雨影响的湖泊中, 浮游动物种的数量减少, 多样性降低, 生物量下降。加拿大的湖泊调查发现pH为5以上时, 浮游动物有9—16种, pH为5以下时仅1—7种<sup>[1]</sup>。另一小湖随着酸度减少, 湖泊中的嗜酸轮虫——牛头龟甲轮虫(*Keratella taurocephala*)数量大大减少, 而多肢轮虫

(*Polyarthra trigla*)、卵形彩胃轮虫(*Chromogaster ovalis*)、游泳拟聚花轮虫(*Conochiloides natans*)、和似异尾轮虫(*Trichocera similis*)数量大大增加<sup>[17]</sup>。枝角类在酸化湖泊中占优势的是象鼻溞科(*Bosminidae*)<sup>[18]</sup>。蚤状溞(*Daphnia pulex*)在pH4.3以下时完全不能存活, pH5时存活率降低, 低于pH7时影响繁殖<sup>[19]</sup>。加拿大从1976年开始在一湖泊中人工加酸( $H_2SO_4$ ), 使湖水pH值由6.7降至5.1, 发现枝角类的绝对数量, 相对丰度, 总生物量均增加。将pH值6.7和pH值5.1时的枝角类种群进行比较, 发现一种溞(*Daphnia galeata mendotae*)消失, 秀体溞(*Diaphanosoma birgei*)变得稀少, 单肢溞(*Holopedium gibberum*)和另一种溞(*D. Catawba*)的丰度增加, 长额象鼻溞(*Bosmina Longirostris*)<sup>[20]</sup>最多。水生昆虫中对酸敏感的种类有蜉蝣目(*Ephemeroptera*)和襀翅目(*Plecoptera*)的某些种类。对酸抗性强的种类有鞘翅目(*Coleoptera*)半翅目(*Hemiptera*)<sup>[21]</sup>。还对在流水中生活的3种昆虫在pH4.0及4.8, 含铝0.05及2.0mg/l的水中试验对呼吸的影响, 发现酸对火把蜉虫(*Ephemera danica*)的呼吸有严重影响, 对两种扁蜉(*Heptagenia*)影响较轻<sup>[22]</sup>。昆虫的羽化期是对酸最敏感的时期。50%成虫羽化的最低pH值, 耐酸种类(如毛翅目*Trichoptera*)为4, 敏感种类(如蜉蝣目)为5.9<sup>[23]</sup>。酸化水体中绝少出现蚌类和螺类, 这是因为这些动物在介壳形成过程中, 需要大量碳酸钙, 因而对水质酸化十分敏感<sup>[12]</sup>。端足目(*Amphipoda*) pH<6时即消失, 而生活在水表层的划蝓科(*Corixidae*)抗性却很强, 常为酸性湖泊中的优势类群<sup>[11]</sup>。

鱼类是水生系统中的次级或更高级消费者, 也是水体生产力中的主要产物。早在本世纪二十年代, 挪威就发现酸雨影响南部河流而使大西洋鲑鱼数量锐减。以后有7条河流pH降至4.5—5.5, 鲑鱼就绝迹了<sup>[1]</sup>。挪威从700个湖泊调查中看出, pH5.5以下鱼群就消失或稀少<sup>[10]</sup>。加拿大魁北克省27个湖泊的调查发现, 美洲红点鲑(*Salvelinus fontinalis*)的数量随湖水酸度增加而减少, 在3个含钙量低的酸化湖泊中, 此种鱼完全消失, 并发现鱼鳃中的铝含量随体长及湖水中pH值的增加而减少<sup>[25]</sup>。安大略省一鳟鱼孵化场曾因融雪带入酸性物质, 水的pH值降为4, 鳟鱼血浆中迅速失去Na和Cl, 28小时后死亡, 而水中的铝的浓度由4.2 $\mu$ g/l增至222 $\mu$ g/l<sup>[3]</sup>。分别取自酸性和中性湖泊中的河鲈(*Perca fluviatilis*), 在酸性水中实验, 发现两种来源的鱼, 其血浆渗透压及血浆中Na和Cl浓度都下降, 特别是pH4.5与4.1两试验组差异更为显著, 来自酸性湖泊的鱼在较高pH时, 血细胞比容较来自中性湖泊的增加迅速<sup>[26]</sup>。另外, 还在pH7.5, 4.5, 4.0及8 $\mu$ mol/l的Al, 10与50 $\mu$ mol/l的Ca的条件下试验鳟鱼中Na的输入和输出。发现低pH对Na的输入有轻微影响, 但对输出则有增加, 特别是低Ca时的影响更大, 8 $\mu$ mol/l的铝和pH4.5与4.0时显著减少输入<sup>[27]</sup>。调查中发现, 当湖水酸化且金属含量高时, 会影响白亚口鱼(*Catostomus commersoni*)骨的钙化<sup>[28]</sup>。在pH4.5、5.0及7.0的水中各加入10、100 ppm的 $Al_2(SO_4)_3$ , 进行对金体美鳊鱼(*Notemigonus crysoleucas*)的毒性试验, 发现pH4.5和5.0均与Al含量有明显协同毒性<sup>[29]</sup>。

在受酸雨影响的水体中, 鱼群的消失一般与下述两种情况有关。一种情况是在短期内pH值突然下降, 在酸的冲击下, 使鱼类在正常情况时本来不致于死亡的pH值中出现死亡。这是一种急性中毒, 毒性的靶器官是鳃。此种情况通常发生在早春, 由于冰雪的融化, 将冬天累积的酸性物质带入水中。另一种情况是水的pH值随着时间的推移而逐渐下降, 鱼长期生活在持续的酸性水中, 繁殖产卵功能失常, 鱼卵和鱼苗又远比成鱼敏感, 结果鱼群密度逐渐变小, 最后导致酸性湖泊中的鱼群消失。这种情况比急性死亡更为常见, 也是酸性湖泊中鱼类消亡的主要原因。

在酸性水体中引起鱼类中毒的毒性因素除过量的氢离子外, 还有重金属等, 其中特别是铝。铝在pH为5左右时, 毒性最大<sup>[30]</sup>。可见在某些情况下, 因水体酸化引起的铝浓度升高是比过量氢离子更为重要的毒性因素。氢离子与毒性铝对鱼的毒性作用方式非常接近, 都能引起鱼的体盐调节功能紊乱, 酸碱平衡失调, 气体交换受阻及抗病力下降。其中鱼类的体盐调节功能的破坏是死亡的最重要原因, 因此水中钙钠离子浓度的提高可以部分抵消酸和铝的毒性<sup>[30]</sup>。

加拿大还对安大略省中部20个pH为4.55—6.37, 碱度为1.9—23.2mg/l( $CaCO_3$ )的池塘进行调查, 发

现pH越低,牛蛙(*Rana catesbiana*)、小北鲢(*R. clamitans*)和十仁花雨蛙(*R. crucifer*)的密度也越低,只有林蛙(*R. sylvatica*)在越酸的池塘中密度越大。将美洲黑鸭(*Anas rubripes*)及长尾金眼鸭(*Bucephala clangula*)的雏鸭放入两个酸化湖泊中,湖中的美洲红点鲑与鸭在食物上有竞争,加上酸性环境的影响,鸭的生长受到显著影响,特别是美洲黑鸭所受的影响最大<sup>[31]</sup>。

### 国内近年来开展的工作

国内对酸雨生态效应的研究起步较晚。中国科学院水生生物研究所曾对重庆市及其附近的水域进行了酸雨对水生生态系统、水产养殖和资源影响的调查;中国海洋湖沼学会在南昌、九江、杭州、上海、青岛等城市周围的水域也进行了类似调查。中国科学院生态环境研究中心对重庆市附近水体进行了水化学调查。以上调查结果表明,迄今在我国还没有发现明显酸化的湖泊。只是在某些鱼塘内出现过雨后鱼卵和鱼苗死亡的情况。不过这些调查都是局部的,且限于大城市附近。酸雨对我国水生生态系统的潜在危害还尚未被完全认识。

由于不同的水生生物种类对低pH值的耐受性有显著的差异,国外在室内外研究中取得的数据不完全适用于我国的特有鱼类,因此近年来我国一些科研机构相继开展了室内低pH的毒性实验。中国科学院水生生物研究所早在1960年就进行过“青、草、鲢、鳙、鲤对氢离子浓度的生存适应性”研究,提供了基础性的资料。近年来又以鲢鱼、鳙鱼、草鱼的早期生活阶段为材料进行了低pH对发育、孵化、存活、畸形率等方面影响的研究。未发现这三种饲养鱼对低pH的敏感性有显著差异。但不同生活阶段的敏感性相差很大。其相对敏感性次序为:受精卵>鱼苗>幼鱼。以白鲢为例,其96小时LC<sub>50</sub>值(半致死水平)分别为pH5.34, 4.51和3.80。在10天内不引起显著死亡率的最低pH水平分别为6.0, 5.0和4.5。随着pH值的降低,孵化率和孵化速度减小,畸形率增高。在pH<6.5时,孵化率显著低于对照组,pH≤6.0时,畸形率显著高于对照组。上海市环境科学保护研究所室内用人为酸化的淀山湖湖水进行了类似试验,得出对鲢鱼不同生活阶段的96小时LC<sub>50</sub>值,与上述结果非常接近。他们还进行了生长试验,发现鲢鱼幼鱼的体长在pH≤6.0时与对照组有显著差异。四川省环境保护科研监测所对鲢鱼的胚胎和仔鱼为对象,进行了水体酸化的毒性试验,得出了胚胎和仔鱼发育过程对pH值的敏感性及其变化规律。实验结果表明:当pH>5.9时,对卵的孵化和仔鱼的生存与生长不会产生显著影响。

中国科学院水生生物研究所对鱼类的主要饵料生物——枝角类进行了存活、生长和生殖影响的研究。所用材料为大型溞(*Daphnia magna*)。急性试验结果是:24小时LC<sub>50</sub>值为pH4.66±0.19,48小时LC<sub>50</sub>值为pH4.94±0.20。慢性试验中平均存活时间在0天(pH4.0)至14天(pH7.0和对照)之间。溞自出生到第14天试验结束,随pH值的降低,其平均体长逐渐减少,生殖量逐渐下降。上海市环境科学保护研究所发现淀山湖枝角类区系中的优势种——透明溞的繁殖能力受低pH值的明显影响。当pH值≤6.0时,其产仔总数及生殖频率显著降低,初次生殖时间明显推迟。

在底栖动物方面,中国科学院水生生物研究所对椭圆萝卜螺(*Radix swinhoei*)的试验结果是:当pH值为3.6, 3.8, 4.0和4.2时,其96小时累积死亡率分别是100%, 80%, 20%和10%。

### 几点建议

1. 在全国进行酸雨对水体影响的普查工作,绘制我国水体酸度图,作为我国水体酸度的本底或现状。
2. 我国水体对酸沉降的缓冲能力与其他国家不同,国内不同地区反应也不一。需要研究各种水体的酸性容量,制作模型、预测今后酸雨污染可能产生的后果。
3. 进一步加强酸雨对水生生态系统影响的研究,以便为酸雨的控制和治理决策提供某些方面的科学依据。
4. 我国的淡水养殖鱼类主要是鲤科种类,而鲤科鱼类对酸化一般较其它鱼类敏感,我国又是世界上

主要的水产养殖国家之一,因此要加强研究酸化与水产养殖的关系。

5. 我国两广地区广泛分布着酸性土壤和砖红壤,其缓冲能力很差;西南和华东地区也是酸雨频率高的主要地区。应密切注意这些地区水域酸化的潜在危险。

6. 防治酸雨危害的根本途径之一是充分综合利用煤资源,因此应大力开展煤资源综合利用的研究。

### 参 考 文 献

- [1] Bubnick, D.V., 1984, Adverse and beneficial effects of acid precipitation, 262—312, Noyes Publ. New Jersey.
- [2] D'Itri, F.M., 1982, Acid precipitation effects on ecological systems, 11—18, Ann Arbor Sci. Publ. Ann Arbor.
- [3] Turner, R.S., D.W. Johnson, J.N. Elwood, W. Van Winkle and R.B. Clapp, 1986, Factors affecting the long-term response of surface water to acidic deposition, state-of-the-science, Publ. Oak Ridge National Lab., 1—271.
- [4] Minas, C.K. and J.R.M. Kelso, 1985, Estimate of existing and potential impact of acidification on the freshwater fishery resources and their use in eastern Canada, *Water Air Soil Pollut.* 30(3—4):1079—1090.
- [5] Fraser, A.S., 1986, Aquatic characterization for resources at risk in eastern Canada, *Water Air Soil Pollut.* 31(3—4):1089—1078.
- [6] Saven, I., 1985, Bibliography of Swedish acidification literature, 1975—1985, National Swedish EPA, Solna.
- [7] Overrein, L.N., H.M. Selp and A. Tollan, 1980, Acid precipitation—Effects on forest and fish, Norwegian Ministry of Environment, Oslo.
- [8] Leuven, R.S.E.W., S.E.W. Bonga, F.G.F. Oyen, and W. Hagemeijer, 1987, Effects of acid stress on the distribution and reproductive success of freshwater fish in Dutch soft waters. In Witters, H. and O. Vande borghed ed., "Ecophysiology of acid stress in aquatic organisms" 231—242.
- [9] Cronan, C.S. and C.L. Schofield, 1979, Aluminum leaching response to acid precipitation: Effects on high-elevation watersheds in the northeast, *Science* 204 (4300):304—306.
- [10] Giessing, E.T., A. Henriksen, M. Johannessen, and R.F. Wright, 1979, Effects of acid precipitation on freshwater chemistry. In F.H. Brække ed., "Impact of acid precipitation on forest and freshwater ecosystems in Norway" 64—85, Norwegian Ministry of Environment, Oslo.
- [11] Hall, R.J., G.E. Likens, S.B. Flanca and G.R. Hendrey, 1980, Experimental acidification of a stream in the Hubbard Brook experimental forest, New Hampshire., *Ecology* 61(4):976—989.
- [12] Burton, T.M., R.M. Stanford and J.W. Allen, 1982, The effects of acidification on stream ecosystems. In: F.M.D. Itri ed., "Acid precipitation effects on ecosystems" 209—235.
- [13] Gahrnst-oem, G. and G. Andersson, 1985, An attempt to quantify sediment processes in the acidified lake Gaardsjoen, Sweden, *Ecol. Bull.* 39:327—336.
- [14] Mills, K.H. and D.W. Schindler, 1985, Biological indicators of lake acidification, *Water Air Soil Pollut.* 30(3—4):779—790.
- [15] Rae, S.S. and A.A. Jurkovic, 1984, Bacterial activity in sediments of lakes receiving acid precipitation, *Environ. Pollut.* 36(3):195—205.
- [16] Leivestad, H., G. Hendrey, I.P. Muniz and E. Snekvik, 1976, Effects of acid precipitation on freshwater organisms. In: F.H. Brække ed., "Impact of acid precipitation on forest and freshwater ecosystem in Norway" 87—111, Norwegian Ministry of Environment, Oslo.
- [17] MacIsaac, W., H.C. Kellen, T.C. Hutchinson and N.D. Yan, 1985, Natural changes in the planktonic rotifers of a small acid lake near Sudbury, Ontario following water quality improvements, *Water Air Soil Pollut.* 30(3—4):791—797.
- [18] Almer, B., W. Dickson, C. Ekstrom, E. Hornstrom and U. Miller, 1974, Effects of acidification on Swedish lakes, *Ambio* 3:30—36.
- [19] Brehm, J. and M.P.D. Meijering, 1986, On the sensitivity of low pH of some selected freshwater crustaceans, *Can. Transl. Fish. Aquat. Sci.* 1—15, Ottawa.
- [20] Malley, D.F. and P.S.S. Chang, 1985, Increase in the abundance of cladocera at pH 5.1 in experimentally acidified lake 223, experimental area, Ontario, *Water Air Soil Pollut.* 30(3—4):829—838.

- [21] Singer, R., 1982, Effects of acidic precipitation on benthos, In: F.M. D'Itri ed., "Acid precipitation effects on ecological systems" 323—363.
- [22] Horrmann, J. and K.G. Andersson, 1985, Aluminium impact on respiration of lotic mayflies at low pH, *Water Air Soil Pollut.* 30(3—4):703—710.
- [23] Bell, H.L., 1971, Effects of low pH on the survival and emergence of aquatic insects, *Water Res.* 5: 313—319.
- [24] Sutcliffe, D. W. and T. R. Carrick, 1973, Studies on mountain streams in the English lake district, *Freshwater Biol.* 3: 437—462.
- [25] Haines, T.A., S.J. Panweis, C.H. Jørgen and S.A. Norton, 1987, Effects of acidity-related water and sediment chemistry variables on trace metal burdens in brook trout (*Salvelinus fontinalis*). In: H. Wintery and D. Vander ed., "Ecophysiology of acid stress in aquatic organisms, 45—55.
- [26] Rack, M., and E. Virtanen, 1985, Responses of perch, *Perca fluviatilis* L. from acidic and a neutral lake to acidic water, *Water Air Soil Pollut.* 30(3—4):537—544.
- [27] Dalziel, T.R.K., R. Morris and D.J.A. Brown, 1985, The effects of low pH, low calcium concentrations and elevated aluminium concentrations on sodium fluxes in brown trout, *Salmo trutta*, *Water Air Soil Pollut.* 30(3—4):569—577.
- [28] Benpell-Young, L.I. and H.H. Harvey, 1986, Metal concentration and calcification of bone of white sucker (*Catostomus commersoni*) in relation to lake pH, *Water Air Soil Pollut.* 30(3—4):657—664.
- [29] Robinson, J.W. and P.M. Deana, 1985, The synergistic effects of acidity and aluminium on fish (golden shiners) in Louisiana, *J. Environ. Sci. Health.* part A. 20A(2):193—204.
- [30] Lefvestad, H., 1980, Acidification—Effects on freshwater fish, *Proc., Int. Conf. Ecol. Impact Acid Precip.* 84—92, NORWAY.
- [31] DerGranges, J.L. and J. Rodrigue, 1985, Influence of acidity and competition with fish on the development of ducklings in Quebec, *Water Air Soil Pollut.* 30(3—4):734—750.
- [32] Clark, K.L., 1985, Distributions of anuran populations in central Ontario relative to habitat acidity, *Water Air Soil Pollut.* 30(3—4):727—734.

## STUDIES ON THE EFFECT OF ACID RAIN ON AQUATIC ORGANISMS

Wang Deming Li Xinfu Zhuang Dehui Liu Baoyuan  
(Institute of Hydrobiology, Academia Sinica, Wuhan)

Acid rain, caused by the emission of sulfur and nitrogen oxides to the atmosphere and their subsequent transformation to sulfates and nitrates, is one of the most widely known environmental issues of the day. The potential consequences of increasingly widespread acid rain demand that this problem should be carefully studied. One of the most pressing issues currently facing environmental biologist is the need to predict the impact of acid rain on water bodies and the effect of acid deposition on aquatic organisms. This paper focuses on the area where acid deposition is most widespread and deleterious and analyzes the effects on aquatic organisms.

Depending on various factors, lakes and watersheds exhibit a range of sensitivity to acidification. Studies indicate that the capability of a lake and its drainage basin to neutralize the acid inputs of acid rain is largely predicated on the

composition of the bedrock of the watershed. The death of fish in acidified freshwater lakes and streams has been more thoroughly studied, both in laboratory and in the field, than any other aspect of lake and stream acidification. Elimination or reduction of a fish population is the most obvious biological impact associated with acidification of freshwater lakes and streams. Organisms at all trophic levels within the food web may be affected. Species can be reduced in number and variety, and primary production and decomposition may be impaired with a resultant disruption of the entire aquatic ecosystem.

Our experiments indicate that the order of relative sensitivity of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*), bighead (*Aristichthys nobilis*) and grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) to acid is fertilized egg > fry > fingerling. The values of 96 hr  $LC_{50}$  of silver carp are pH 5.34, 4.51 and 3.80 respectively. The acute effects of acid rain on *Daphnia magna* are pH  $4.66 \pm 0.19$  (24 hr  $LC_{50}$ ) and pH  $4.90 \pm 0.20$  (48 hr  $LC_{50}$ ). The 96 hr accumulated death rates of *Radix swinhoei* to acid are 100%, 60%, 20% and 10% at pH 3.6, 3.8, 4.0 and 4.2 respectively.

Several topics for future research have been suggested by the author.

**Key words:** acid rain, watersheds, aquatic ecosystem, acidification, effect,