

85-91

酸雨对水生态系统中一些生物的影响

庄德辉

(中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

X503.2

摘要 本文综述酸雨对水生态系统中各营养级生物的影响。介绍酸雨引起水体酸化和水体的缓冲能力, 阐述不同营养级水生生物和所处不同发育阶段对低 pH 的敏感性差异。还讨论了由于遗传和适应引起生物对低 pH 的耐受性差异。酸化水体生物群落的重要特征是, 生物种类数减少, 多样性降低, 生物量减少和食物链遭破坏。酸性 pH 对水生生物的毒作用方式包括气体交换受阻、体盐调节紊乱、酸碱平衡失调, 以及与金属的联合作用等。最后还对若干问题作了扼要讨论, 并提出建议。

关键词 酸雨, 酸性 pH, 水生态系统, 水生生物群落

酸雨是目前全球性环境问题之一。它不仅腐蚀建筑物和金属材料, 毁坏森林和农作物, 且引起的水体酸化, 严重危害水生态系统。

早在 70 年代中期, 酸雨对北欧和美洲东北部水生态系统的影响, 就引起广泛的关注。我国近年来的调查表明, 西南(四川和贵州)和华南(广东和广西)是重酸雨区, 其它省份也有局部酸雨发生。某些地区降水的平均 pH 值低于 5.6 或 5.0, 甚至在长江以南有 13 个观测站曾发现降水的平均 pH 值小于 4.5。这表明酸雨在我国局部地区已达相当严重程度。据国外研究报道, 酸雨对水环境影响的重要特征是引起水体酸化, 使鱼类及一些水生生物数量和种类减少, 甚至灭绝。虽然在我国现在尚未见到因酸雨引起水体酸化的报道, 但对酸雨敏感的低碱度水体, 在酸雨长期的作用下可能被酸化, 特别是在以燃烧含硫量高的煤碳作为主要能源的地区, 更具潜在危险性。目前我国还未进行水体酸化的全面普查, 尚不能认为没有酸雨引起的酸化水体存在。本文综述酸雨对水生生物的影响, 可为了解酸雨对水体危害的现状以及预测酸雨对水生态系统可能的破坏提供必要资料。

一、水体酸化

酸雨降落到湖泊、河流及其汇水区, 除部分被土壤和植被吸收外, 其余的进入水体。水体对酸的缓冲能力取决于土壤与岩基的类型与化学性质和水体本身的碱度、硬度等。以石灰岩为主要基岩的地区, 水体的缓冲能力较强, 属于对酸雨不敏感地区, 而以花岗岩、石英岩等为主的硅质基岩地区, 水体的缓冲能力较弱, 属于对酸雨敏感地区。据报道, 瑞典的湖泊自 30

年代以来,平均 pH 值下降 1.8,在 84000 个面积大于 1hm² 的湖泊中,已有 18000 个湖泊酸化,4000 个湖泊已遭严重生态危害。此外,加拿大、挪威、苏格兰和比利时等国家都有水体被酸化的报道。据美国 27 个州的资料,按湖泊和河流的水的碱度,对酸雨敏感性划分的标准^[1]如下:

等 级	碱度 (1/2CaCO ₃ μmol/L)
1. 已 酸 化	0
2. 极 度 敏 感	1—39
3. 中 度 敏 感	40—199
4. 低 度 敏 感	200—499
5. 不 敏 感	≥500

据此标准衡量,重庆南山和缙云山等地有些水体(碱度为 110~120μmol/L)属于中度敏感。

二、各营养级水生生物和所处不同发育阶段对低 pH 的敏感性以及遗传和适应

(一)不同类群敏感性的差异

1. 分解者

水体酸化抑制分解者细菌和真菌的活动,阻碍有机物进入能量流通和营养循环,致使水体贫营养化、生产力下降。

2. 生产者

藻类是水体的主要初级生产者。据水生所试验 pH5.0—5.5 是藻类生长的阈限。pH 高于 5.5,藻类始能生长正常;pH5.0 或低于 5.0,生长受到抑制。在酸化水体中,藻类数量减少,特别是在藻类形成水华季节,与邻近非酸化水体相比,种类明显偏少^[2]。

高等水生植物是某些水生态系统的另一类重要初级生产者,对 pH 的适应范围一般较宽。有些种类,如藨、莴齿眼子菜、浮萍等喜好偏碱环境条件,对水体酸化较敏感。而另一些种类,如莼菜、睡莲、日本萍蓬草、普通眼子菜、浮叶眼子菜等喜好偏酸条件^[3],可在一定程度上耐受水体酸化。

3. 初级消费者

(1)浮游动物 水体酸化使浮游动物种类减少,多样性下降,生物量减低。但有些枝角类如象鼻蚤、单肢肢蚤和大眼蚤等能适应与耐受酸化水体^[4-6]。我所进行的低 pH 对大型蚤存活、生长和生殖影响的急性和慢性试验表明,在 25±1℃ 条件下,24hLL₅₀ 为 pH4.66±0.19,48hLL₅₀ 为 pH4.94±0.20;慢性暴露 14 天,pH4.0 试验组平均存活不到 24 小时,pH7.0 试验组和对照组在 14 天内全部存活,在 pH4—7 之间,随 pH 值的下降,平均体长逐渐减小,生殖量逐渐减少。桡足类中有不少种类耐酸范围较广,如据加拿大安大略 47 个酸化湖泊的调查,一种中剑中蚤 (*Mesocyclops edax*)、一种剑水蚤 (*Cyclops bicuspidatus*) 和一种镖水蚤 (*Diaptomus minutus*) 出现在所有调查湖泊的 pH 范围中;又如在我们的酸化和模拟酸雨试

验 30 天,透明剑水蚤在 pH5.0 及其以下各试验组的数量都占绝对优势;广布中剑水蚤是耐酸的,在 pH 低到 4.5 都有它的存在,pH3.0 才消失。但也有不耐酸的种类,如泽柔近剑水蚤、正尾水蚤和一种镖水蚤(*Diaptomus oregonensis*)等没有或很少在 pH5.0 以下水体中出现^[6]。轮虫方面,根据德国莱比锡池沼的调查,在 pH4.2—5.5 的水体中出现 32 属 78 种^[2]。作者认为大多数轮虫喜好栖息在弱酸性水体中。轮虫中螺形龟甲轮虫是最具生态耐性的,甚至有人认为其分布不受 pH 的限制,在酸化的湖泊中常成为单一的优势种。试验结果表明,这一种轮虫在 pH3.0—8.3 都能存活。

(2)底栖动物 软体动物在酸化水体中很少出现,因为软体动物介壳的形成需要大量的碳酸钙,而水体酸化后碳酸钙含量很少或甚至完全没有,将妨碍介壳的形成,软体动物难以生存^[1,7]。我所在 pH5.0 和 4.5 条件下对椭圆萝卜螺饲养试验结果表明,卵袋数量减少,孵化时间延长,存活个体的螺壳变薄、易损。

各类群的水生昆虫对酸化的忍耐能力有很大差异。襃翅目、鞘翅目和半翅目比较敏感,它们的最低 pH 中值约为 6.0;双翅目的最低 pH 中值为 5.5,该目中的摇蚊科有些种类很耐酸,曾发现存在于 pH2.8 的环境中^[7]。毛翅目也较耐酸,可生存在 pH5.0 以下的水体中。

4. 次级消费者

(1)鱼类 早在本世纪 20 年代,挪威南部酸化河流中就发现大西洋鲑产量锐减。根据挪威 700 个湖泊的调查,有 80—85% 湖泊 pH 在 5 以下,其中鱼类稀少或消失。美国东北部 849 个湖泊中,pH 小于 5 的有 212 个,在 5—6 之间的有 256,其中至少有 113 个湖泊完全没有鱼类。鱼类的不同科对低 pH 的耐受能力有差异。鲤科鱼类对低 pH 最敏感,在 6.0 以下,种类明显减少;而蛙科鱼类比较耐酸,在 pH 低到 5.0 时都没有明显减少。除鲈科鱼类外,同一科内不同种类耐酸能力没有明显的不同。镖鲈亚科的分布类似于鲤科,而金鲈是最耐酸的^[7]。低 pH 对鱼类的影响有两种方式,一是急性死亡,另一是慢性中毒。冬末和初春,化雪溶冰或暴雨时,河流和湖泊中 pH 骤然下降,可引起鱼的大量死亡;在受酸雨影响而逐渐酸化的水体中,低 pH 对鱼类发育和繁殖十分有害。在鱼类生活周期中,产卵和仔鱼阶段对低 pH 最敏感,一旦受到影响,就不能顺利繁衍后代,甚至造成鱼类从天然水体中消失。

(2)两栖类 两栖类动物产卵在水塘,直接受水中 pH 的影响,特别是在浅滩和间歇性水洼产卵的种类,受害更大。据观测,青蛙蝌蚪在 pH3.7—4.6 时,发育异常(畸形),小于 4.0 时出现死亡,低于 6.0 时,斑点蝾螈发育受到抑制,卵的死亡率增加^[2]。加拿大安大略省 20 个 pH 为 4.55—6.36 的池塘进行调查时发现,牛蛙、小池蛙和十字花雨蛙的蝌蚪,pH 越低这些蛙的密度越小。欧洲林蛙蝌蚪在软水中 pH4.0 时出现畸形。在含 Ca2mg/L 及 Al0.2mg/L 的水中,当 pH4.5 时林蛙蝌蚪全部死亡;当含 Ca40mg/L、pH 上升至 5.3 时,0.2mg/L 的 Al 对林蛙卵发育的影响减弱。

5. 各类群生物对低 pH 敏感性的比较

Eilers(1984)^[7]用电子计算机处理了水生生物 9 个分类类群生存水域的 2 千多个最低 pH 值,结果表明,不同分类类群最低 pH 中值的分布是不同的。在每一类群内,最低 pH 中值范围也很宽,特别是藻类、水生昆虫、轮虫和甲壳动物。软体动物和蛭类很少出现在 pH5.7 以下的水环境中,最低 pH 中值分别为 6.6 和 6.7。轮虫比较耐酸,最低 pH 中值为 5.0。其

它多数水生生物类群的最低 pH 中值在 6.1 和 5.2 之间。淡水生物群落的 3 个主要类群(藻类、甲壳动物和鱼类)其最低 pH 中值为 5.6—5.3,变化在 0.3 之内。

(二)不同发育阶段敏感性的差异

水生生物不同发育阶段对低 pH 的敏感性差异很大。Daye 和 Garside (1975)^[6], Menendez(1976)^[9]和 Kwain (1975)^[10]曾指出,鱼类对低 pH 的耐受能力在很大程度上取决于试验鱼的生活阶段。低 pH 对鲢鱼鱼种、鱼苗和胚胎的 LL_{50} ,如以氢离子浓度计算,分别为 51286、2000 和 501nM/L。若与鱼种相比,鱼苗和胚胎对低 pH 的敏感性分别提高了 25.6 倍和 102 倍^[11]。近年来,为了研究鲢、鳙和草鱼对 pH 的敏感性,测定了低 pH 对发育、孵化、存活和畸形率等的影响,结果表明这 3 种养殖鱼对低 pH 的敏感性没有显著差异,但不同生活阶段敏感性差异很大,比较敏感性顺序为:受精卵>鱼苗>幼鱼^[12]。由于鲢鱼受精卵对低 pH 最为敏感,pH6.5 时的孵化率就有明显下降,因此建议在鱼卵孵化期,水中 pH 值应保持在 6.5 以上。为了使鱼苗有较高的存活率,鱼苗期水中 pH 值不宜低于 6.1^[11]。

(三)遗传和适应引起敏感性的差异

Beebee 和 Griffin (1977)^[13]报道了同一种蛙(*Bufo calamita*)不同品系对酸水的耐受能力有很大的差异。Gjedrem(1980)^[14]指出,不同品系的同一种鳟鱼暴露于低 pH 水中的存活率差异达 60%,他认为这是由于种内遗传的变异性。Rahel 和 Magnuson (1980)^[15]通过金鲈的研究认为,对酸耐受能力的差异与其说归因于遗传的变异,倒不如说是适应的结果。Irojonar 等(1977)^[16]的研究结果表明,经酸适应的鱼,对酸的耐受性有所提高。

三、低 pH 引起水生态系统的变化

(一)群落结构的变化

与正常水体相比,酸化水体水生生物群落的重要特征是:种类数减少,多样性降低,生物量减小。湖泊中单一种类的出现是阿尔卑斯山和北极地区湖泊的特征,而这种现象也出现于酸化湖泊。加拿大 47 个酸性湖泊的调查发现,随着 pH 增高,浮游动物群落结构的复杂性也增高。在 pH5.0 及其以下的湖泊中,群落中有 1—7 个物种,但其中仅 1 或 2 个优势种;在 pH5.0 及其以上的湖泊,群落常含有 9—16 物种,其中有 3 或 4 个优势种。在酸化水体中不仅生物种类减少,而且生物数量也减少。美国纽约州某山区 20 个酸化湖泊的调查结果表明,浮游动物多样性和生物量均下降,pH 值每下降 1 个单位,浮游动物减少 2.4 和 22.6mg 干重/ m^3 ^[4]。我们的酸化和模拟酸雨试验结果表明,桡足类在 pH5.5 以上时的数量所占比例较大,pH5.5 以下时所占比例较小;而轮虫则相反。这说明随 pH 值下降,出现轮虫逐渐取代桡足类的趋势。

(二)水生食物链的破坏

在正常水体中,生产者、消费者和分解者之间的物质和能量循环,保持着相对平衡状态。一旦酸化,任何一类水生生物受害,则整个水生食物链将遭到破坏,使水生态失去平衡。例如大马哈鱼在酸化水体中消失,是由于水的 pH 下降,抑制浮游植物的生长,影响以浮游植物为食的钩虾和栉水虱等的繁衍,以至于大马哈鱼缺少以后二者为主的饵料生物而无法生存。

酸化水体中,水蛭的消失是与腹足类灭绝相关,一旦腹足类灭绝,水蛭就没有合适的被捕食者。在酸化河流中,由于周丛生物的减少,使草食和刮食动物也骤减,而食碎屑动物却增加^[17]。

(三)水生生物体内金属离子浓度增高

由于金属的溶解度、活动性和可获得性在 pH 降低时均显著增加,受酸雨影响的水体内金属离子浓度一般较高。挪威、瑞典和加拿大的资料表明,酸化水体中的 Zn、Pb、Cu、Cd 和 Ni 等金属离子浓度均较高。这些元素并不完全来自酸雨,很大程度是由于酸化土壤被淋溶后随地表径流或地下水进入水体。酸雨也从大气中获取汞和其它金属,导致湖泊中水生生物体内金属的积累增高,甚至在边远地带和高山地区鱼体内也有这些金属的积累。汞的微生物甲基化与 pH 有关,pH5—6 条件下甲基化过程快于 pH7.0;甲基汞的毒性较大,在低 pH 水体中除生物体内汞的积累增大外,毒性也大大增强。

四、低 pH 的毒作用方式

(一)气体代谢受阻

Alibone 等(1981)^[18]测定大型蚤在 pH4.00—7.25 条件下的呼吸速率,随 pH 下降而降低。在 pH6.0—7.0 之间时的呼吸速率变化明显大于在 pH4.0—5.0 之间时的变化。呼吸过程中排出的 CO₂ 与水中 CO₂ 浓度存在着一定的相互关系,当 pH 低于 6.0 时,水中 CO₂ 60% 以上是游离的,而当 pH4.0 时,100%CO₂ 是游离的。因此,低 pH 水中的 CO₂ 一定的含量,足以抑制 CO₂ 从大型蚤或其它水生动物鳃组织的呼出。使血液内 CO₂ 压力增加,提高血液的酸度,从而降低血液对 O₂ 的亲合力。因此,在低 pH 条件下,动物对 O₂ 吸收率就会降低,造成缺氧。

水中 pH 降低,可刺激鱼鳃大量分泌粘液,降低氧气在鳃表面的扩散速度。低 pH 还使鳃表面上皮细胞离开鳃丝组织,出现肿胀和空泡,扩大水与血液间氧气扩散距离,甚至在严重时可使鱼窒息死亡。

(二)体盐调节紊乱

所有的淡水动物都要从水中主动地吸收盐类,鱼鳃和口腔表面的氯细胞具有这一功能。进入体内的 H⁺ 被水中的 Na⁺ 所交换,而 HCO₃⁻ 被 Cl⁻ 所代替,并由浓度梯度支配着保持体内钠和氯浓度不致有大的变动。当环境中氢离子大量渗入时,抑制了氯细胞主动吸收氯和钠和功能,导致体盐浓度极度下降,有时足以引起死亡。试验证明,pH 从 7 降到 4 时,褐鳟鱼钠的损失增加了 3 倍,足以在 24—48 小时内使鱼死亡。从受酸雨影响的河流中取得的鱼,其血浆钠和氯的浓度均低于正常河流中的鱼,因此,用这两个参数作为指标来监测鱼类受酸雨损害的程度。

(三)酸碱平衡失常

鱼类体液中氢离子浓度一般偏碱性,如蛙科动脉血液的 pH 为 7.8—8.0。如果环境中氢离子浓度增加,就会使鱼类体液 pH 下降,酸碱平衡发生紊乱,引起酸血症。当水中 pH 从 6.08 降到 4.06 时,血液 pH 和红血球 pH 分别下降 0.235 和 0.146 个单位。与此同时,鱼的

游动能力明显降低,临界游速降低 15.4%。鱼类本身对低 pH 影响具有调节能力,轻微的酸中毒经数日后可以恢复正常。如果超过鱼体的调节能力,鱼就会死亡。当血液 pH 降至 7.1—7.2 时,鱼很快死亡。

(四)低 pH 与金属的混合毒性

水体酸化引起死鱼,往往是由于低 pH 与某些金属联合作用的结果。Al 的毒性与低 pH 的关系最为密切。以羟基形式出现的 Al 在 pH5 时的毒性最大,高于或低于 pH5 时,毒性较小。pH5 时,0.15mg/L 的 Al,可使血液丧失离子,分泌大量粘液,使鳃粘连,产生急性中毒。在酸化天然水体中的 Al 浓度常在 0.1—0.3mg/L 之间。因此可以认为,在天然水体中对多数生物无害的 Al 浓度,在酸化水体中对鱼类却产生毒害。

五、问题讨论

1. 酸化水体中许多水生生物消失或减少,除了氢离子浓度的影响之外,往往是多种环境因子的综合作用。但限于目前的认识和科学水平,我们还没有充分具体揭示,因此进一步深入研究是必要的。从本文提供的资料,足以使我们认识到水体酸化对水生态系统影响的严重后果。

2. 关于水质的 pH 基准问题,特别是把它应用到渔业上,已被欧洲内陆渔业顾问委员会(EIFAC)(1969)和美国环保局(EPA)(1976)等广泛评述过。普遍的意见是同意 EIFAC 的结论,即没有固定的对渔业无害和超出界限有害的 pH 范围。为了做到既要保护水体中的生物资源,又要符合各水体的实际情况,做到合理利用水体和取得最佳经济效益,因地制宜地分别制订各水体的地方 pH 标准值是值得研究的。

3. 我国幅员广阔,土质多样,对酸雨的缓冲能力各异,必需研究各种水体对酸沉降的容量,为水体酸化预测提供依据。同时有必要开展全国性水体酸化普查,绘制水体酸化图,为研究和保护水体提供基础资料。

4. 为了改善已经酸化水体的水质,瑞典曾对 1500 个湖泊采取了撒石灰的措施,使水中金属离子减少,水生生物丰富,恢复到原来的状态,收到一定的效果。但这种措施不过是一时应急之策。因为酸雨对水生态系统的破坏是始于土壤和森林生态系统的一种复合污染,如没有包括整个流域在内的综合整治的对策,则意义不大。其效果如何,众说纷纭。从我国现状看,酸雨主要属硫酸盐型,因此防治酸雨主要应从减少二氧化硫的排放量考虑。

参 考 文 献

- [1] Bubenick, D. V., Acid rain information book, Second Edition, Noyes publications, New Jersey, 1984, 279—280.
- [2] 雷科德, F. A. 等著(王绍基、周照钦译), 酸雨手册, 原子能出版社, 1986, 166—179.
- [3] 日本生态学会环境问题专门委员会编(卢全章译), 环境和指示生物(水域分册), 北京, 中国环境科学出版社, 1987, 1—380.
- [4] Confer, J. L. and T. Kaaret, Cna. J. Fish. Aquat. Sci., 1983, 40(1), 36—42.
- [5] Malley, D. F. and P. S. S. Chang, Water air soil pollut., 1985, 30(3-4), 629—638.

- [6] Sprules, W. G. , J. Fish. Res. Board Can. , 1975, 32(3), 389—395.
- [7] Eilers, J. M. , G. J. Lien and R. G. Berg, Aquatic organisms in acidic environments, A Literature review. Technical bulletin No. 150, Department of natural resources, Madison, Wisconsin, 1984, 1—18.
- [8] Daye, P. G. and E. T. Garside. Can. J. Zool. , 1975, 53, 639—641.
- [9] Menendez, R. , J. Fish. Res. board can. , 1976, 33: 118—123.
- [10] Kwain, W. , J. Fish Res. Board Can. , 1975, 32: 493—497.
- [11] 贺锡勤、陈锡涛、杨云霞. 中国环境科学, 1986, 6(4), 49—51.
- [12] 王德铭、李辛夫、庄德辉、刘保元. 生态学报, 1989, 9(1), 77—83.
- [13] Beebe, T. J. C. and J. R. Griffin, J. zool. (London), 1977, 181, 341—350.
- [14] Gjedrem, T. Ecological impact of acid precipitation. Proc. Int. Conf. , Sandefjord, Norway, 1980.
- [15] Rahel, F. J. and J. J. Magnuson, Ecological impact of acid precipitation. Proc. Int. Conf. , Sandefjord, Norway. SNSF Project. Oslo, 383, 1980.
- [16] Projonar, J. R. , J. Fish. Res. Bord Can. , 1977, 34: 574—579.
- [17] Nilsson, J. P. , Internationale revue des gesamtem hydrobiologie, 1980, 65(2), 177—207.
- [18] Alibone, M. R. and P. Fair, Hydrobiologia, 1981, 85(2), 185—188.

EFFECTS OF ACID RAIN ON ORGANISMS IN AQUATIC ECOSYSTEM

Zhuang Dehui

(Institute of Hydrobiology, Academia Sinica, Wuhan 430072)

Abstract

The water bodies acidification of different type of water bodies caused by acid rain and the buffer capacity are introduced and the effects of acid rain on some organisms at various trophic levels in aquatic ecosystem are reviewed. The sensitivity differences to low pH among some aquatic organisms and different developmental stages are summarized. Also, the tolerance variation of organisms to low pH owing to heredity and adaptability is described. The key characteristics of aquatic communities in acidified water are decreased species number, reduced diversity, lessened biomass and destroyed food chain. The toxic effect of low pH on aquatic life include inhibition of gas exchange, disorder of body salt adjustment, imbalance of acidity and alkalinity, and the combined effects with metals. Several problems are briefly discussed and some suggestions are put forward.

Key words Acid rain, acidic pH, aquatic ecosystem, aquatic community