

健康水生态系统的退化及其修复 ——理论、技术及应用*

濮培民 王国祥 李正魁 胡春华 陈宝君
成小英 李波 张圣照 范云崎

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

提 要 由于人口增加和工农业生产的发展,人类赖以生存的淡水生态系统日益退化,特别是富营养化问题,已严重威胁社会经济的持续发展和人类健康.如何在强污染负荷下修复水生态系统具有重大理论和现实意义.本文总结了自1990年以来在淡水湖泊中进行的物理生态工程(Physico-Ecological Engineering, PEEN)实验研究实践.主要结论为:(1)地表水环境治理的主要目标是修复为稳定健康的水生态系统;(2)主要方法是与污染源治理相结合实践物理生态工程(PEEN)和生物环保产业(Bio-Environmental Enterprise, BEE);(3)实现目标的主要途径是星火燎原,从局部到大范围乃至全流域;(4)实现目标的主要关键是抓住四个环节(4M):高等水生植物(Macrophyte),宏观仿生学(Macro-bioimitation),微生物(Microorganism),及管理(Management);(5)山清水秀,人杰地灵,社会经济生态协调发展的美好未来有可能在不远的将来实现.

关键词 健康水生态系统 生态系统修复技术 湖泊富营养化控制 物理生态工程
分类号 Q147

水是生命之源.对人类而言,健康水更是生存的 necessary 资源.人类社会文明通常是在优良水生态系统周边首先发展起来的.由于地表水生态系统结构多种多样,用于水质评价的指标各异,作者认为判别孰优孰劣的标准要以人为本,综合性地考虑.对人类和高等生物健康有利的水生态系统可称谓健康水生态系统.历史和现实证明,山清水秀,人杰地灵,健康水生态系统是哺育人类文明的摇篮,是现代社会持续发展的重要保障,也是人们向往和追求的美好目标.

由于人口增加和工农业生产的发展,进入地表水的污染物质比数十年前有了很大增加,人类赖以生存的淡水生态系统日益退化,特别是富营养化问题,已严重威胁社会经济的持续发展和人类健康.我国淡水湖泊及平原河网大多为浅水水体.历史上水体内有丰富的高等水生植物及相应的鱼、虾、贝、蚌等高等水生动物.许多城镇的饮用水源区大多选择在这种生物多样性丰富的水体内^[1].随着水体污染负荷的增加,历史上的这些清洁水源区逐渐退化为缺少水生高等生物的以藻类和微生物为主的“荒漠化”水域.

由贫营养型向富营养型发展是湖泊自然演变的过程.沉水植物的出现是湖泊富营养化发展过程中自然选择的结果.沉水植物吸收底泥和水中的营养盐生长,分泌的化学信息素(infochemical substances)可遏制浮游植物生长,并共生有利于有机物矿化分解的微生物群落,其生

* 本文主要内容发表在香山科学会议(2001年4月16-18日,北京).

收稿日期:2001-04-30;收到修改稿日期:2001-06-10.濮培民,男,1936年生,研究员,博士生导师.

长周期以月和季节为主,不同沉水植物优势种群的生长季节往往交叉演替,在年度内形成适宜于高等水生生物生存的环境,对水质起持续的净化作用.当水体营养程度进一步提高后,在某种水生高等植物生长的不利季节,特别在其机体的萎缩部位,着生藻类容易孳生.着生藻类、生物残体和颗粒悬移质的增加使水体透明度减少,沉水植物生长率减弱,遏制浮游植物的化学信息素减少,浮游植物种群和生物量进一步发展,水下光照进一步减弱,沉水植物种群逐渐减少,最后甚至全部消失,其它水生生物种类也相应减少,成为以浮游植物为主的生物多样性少的富营养化湖泊.由于浮游植物生长周期以旬为主,其死亡分解时易形成缺氧条件,并经常含有毒素,对高等水生动物的生存构成威胁,这是一种不健康的水体.所以,高等沉水植物种群的减少是健康水生态系统退化的重要指标.在较高营养盐负荷下,浅水水体可以有浮游植物为主的(藻型)不健康水体和以沉水植物为主体的(草型)健康水体两种稳定状态^[2].后者在历史上是太湖流域的主导景观,而且在现实条件下,尽管污染负荷与其它已成为以浮游植物为主体的湖区类似,也仍然在东太湖、长荡湖、固城湖等湖荡、湖区存在.因此,历史和现实说明,建设健康水生态系统既是目标也是主要手段,是改善水质的主要途径.

对退化的健康水生态系统进行修复犹如“逆水行舟”,不进则退.某种稳定的生态系统是在一定污染负荷下调整适应的结果.水质指标是水生态系统指标的组成部分,水质问题是水生态问题,生态问题应该用生态方法来解决.要获取稳定的健康的自然水环境,只有修复已退化的水生态系统.在高污染负荷下如何修复已退化的水生态系统,其理论与技术已成为问题的关键和研究的热点.

1 对传统改善水环境方法的评价

1.1 转移污染源和稀释扩散的道路几乎已走到了尽头

转移污染和稀释扩散对于局部地区讲常常被视为解决污染相对简单、易行和代价较低的办法,但这是一种以邻为壑的办法.就全国来说,我国近海已经受到了相当程度的污染,退路已断.从另一角度看,污水本来也可视为一种资源,特别在有些地区,将污水排掉,既损失了水资源,又损失了其中携带的其它物质资源.在有些地区,一面挖渠(隧)道把污水排掉,一面挖渠(隧)道从远地另寻水源.这样化费的代价是非常昂贵的.实际上,从污染治理来说,是与稀释扩散相反的浓缩富集收集取出水体的过程.因此,要采取措施,污水就地截留,越浓越治理,这样的代价越低.变污染物为资源,在除去污染物获取资源的同时,将污水变为较清洁水.水是可以循环使用的资源.一定要转变观念,把推卸责任变为“各家自扫门前雪”.实际上,工业污染排放标准,远高于地表水Ⅲ类标准.目前我国许多地区地表水系统已劣于或大大劣于Ⅲ类标准.当务之急是将地表水尽快就地治理为不劣于Ⅲ类水.

1.2 投放化学物质对生态系统会带来负面影响

若干化学物质有絮凝、杀藻和除臭等功能,为了提高水体透明度和改善水体观感效果,也有被采用的试验.这种办法除了在时效和在大水域或水体流动性大处有其局限性外,还必须注意其可能的负面影响.尤其是大规模人工合成物的利用破坏了自然环境,必需特别注意其长期的负面效应.

1.3 疏浚底泥可用于水利工程和交通航运需要,但不是控制湖泊富营养化的充要条件

一般情况下湖底是污染物储存库,而不是污染源,在输入污染负荷没有得到明显控制情况

下,需要大量经费投入的大规模疏浚对生态系统的负面影响不容忽视。犹如用挖沙无法治理沙漠和风沙一样,底泥疏浚无法控制水体富营养化^[3]。我国若干湖泊和城市河道已经疏浚,但未见水质稳定改善,许多情况下水质仍继续恶化。例如,太湖流域在1999年底完成了对14406km河道的清淤,挖泥量约 $14 \times 10^6 \text{m}^3$ 。尽管同时已实行了洗衣粉中的“禁磷”政策,但20条主要入太湖河道的年平均总磷(TP)浓度由1998年的0.149mg/L上升为2000年的0.175mg/L,即增加了17%。太湖湖心区的TP浓度也由1998年的0.069mg/L上升为2000年的0.100mg/L,增幅达45%^①。滇池草海在耗资人民币2.5亿元,完成2.828km²上的 $4.24 \times 10^6 \text{m}^3$ 挖泥工程后,1999年5月,草海中心的总氮、总磷和叶绿素a浓度分别达13.03mg/L,1.2mg/L和639.41mg/m³,与挖泥前1994-1996三年平均值的4.21mg/L,0.60mg/L,119.17mg/m³相比均有大幅度增加^②。2000年平均BOD₅,COD_{Mn},TN,TP与1998年相比分别增加了15%,60%,57%和92%^③。我国已在较大规模上进行了需要巨大资金投入的疏浚底泥工程,其对控制水体富营养化的正面和负面效果及其投入效益比如何,是值得认真予以科学总结的。

1.4 生物调控方法过程长,取出营养盐效率低

按照生态效率(Ecological efficiency)原理(又称1/10规律),食物链网越长,转换损耗越多。因此取出原初生产物对减少水体中的营养盐有较高的效率,而取出鱼类资源对削减水体中营养物质的效率则要大大低于直接取出藻类和水生高等植物。

1.5 简单恢复历史景观难以抵御增大的环境负荷及环境灾变

历史景观和相应的水生态系统是在当时污染负荷下自然选择的结果。自然和人类活动造成的环境变化,特别是环境灾害,从局部到大范围破坏了历史景观,说明历史上的水生态系统不能适应这些环境变化。据国家可持续发展水资源战略研究报告,经过努力,有可能实现如下指标:与1997年比,2010年污染负荷将增加14.6%,到2030年污染负荷将增加1.5%,在2050年可控制到1997年的水平^[5]。1997年的污染负荷大大高于1990年的水平。在1990年太湖一次藻类爆发,在一周内由于供水不足,部分工厂停产半停产使无锡市的直接经济损失达人民币1.3亿元。据“八·五”攻关资料(目前情况更不容乐观)太湖流域降水和干沉降合成的氮、磷的浓度为1.2mg/L和0.04mg/L,比相应的国际通常认为的富营养化标准(TN0.2mg/L和TP0.02mg/L)要高出2-6倍;滇池(草海)则超过12-13倍。所以,人口的增长、工农业的增长所增加的污染加上大气干沉降污染在50年或更长些时期内已不可能再控制到50年以前的情况了。在相当长的时期内简单地恢复的历史景观已不能稳定存在,必需发展非常规的新的理论和技术修复稳定的健康水生态系统,以满足社会持续发展的需要。

1990年太湖藻类大爆发后,根据实际需要,作者从此开始了直接治理和控制湖泊富营养化的理论和实验研究。在太湖梅梁湾和五里湖、贵阳红枫湖和南京莫愁湖等水域发展和完善了从局部到大范围治理污染水体的“物理生态工程(Physico-Ecological Engineering, PEEEN)”^[1]。这是主要利用太阳能在局部水域内中性地恢复稳定健康水生生态系统的技术。

① 舒金华,黄文钰,高光等.太湖地区“禁磷”措施效果评估研究报告,2001。

② 根据及昆明市环境监测中心站、昆明市环境科学研究所,滇池污染基本状况,1997

③ 云南省环保局,云南省环境质量报告书(1996年-2000年度)。

2 物理生态工程(PEEN)依据的基本原则

2.1 与污染源控制相结合,主要利用太阳能中性地增加自然水体自净能力是基本指导方针

自然水体有净化(自净)能力.在太阳能作用下,通过生化过程、生命过程、矿化分解过程、沉降过程将水中悬移质、溶解质转化为生物资源、气体和底泥等物质,使水体得到净化.人们用水过程通常是用比较清洁的水去溶解、运载污染物质,即污染过程,是稀释扩散、熵增加的过程.净化是污染的逆过程,是将污染物富集浓缩起来提高能质的过程,是非开放系统在消耗大量能量提高能质、减少熵的有序化过程.藻类和水生高等植物的生物生命过程利用太阳能将水溶质物质富集浓缩,转化为生物量,消耗了大量太阳能,提高了能质.实际自然水体中太阳能的利用率是较低的,仅1%的量级.通过管理、物理措施和移植生物种群等措施,提高广阔自然水体对太阳能的利用率,提高水体自然净化能力是发展 PEEN 的指导方针(图 1).

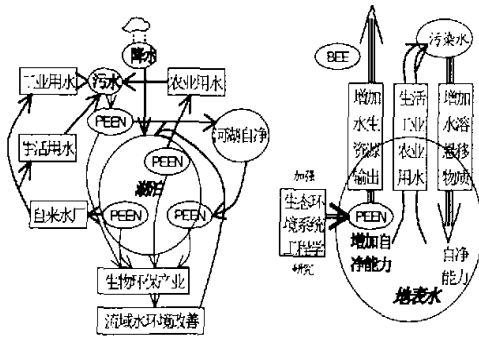


图 1 用 PEEN 提高水体自净能力, 发展生物环保产业(BEE)

Fig. 1 Development of Bio-Environmental Enterprise (BEE) by using Physico-Ecological Engineering (PEEN) for increasing self-purification of water bodies

资源化利用水中污染物发展生物环保产业 (Bio-Environmental Enterprise, BEE) 是地表水治理的最优目标. 主要利用太阳能和生物过程, 将水中污染物转化为生物资源, 并尽可能将资源取出利用, 获取经济效益, 形成生物环保产业(图 1). 在将水中物质取出水体方式中, 输出生物资源的方式比用气态逸出和固态沉降更有利于环境保护和获取经济效益. 输出水生植物可最 直接地输出营养盐. 例如, 太湖水面在夏季 凤眼莲的生产力为 $0.5\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 蓝藻 生产力为 $6.2\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 相应地凤眼莲吸收 氮、磷的能力为 $0.79\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{d})$ and $0.13\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{d})$, 是蓝藻的 13 和 21 倍^[1]. 生物资源 可用作食品、饲料、肥料等, 具有经济价

值. 把环境治理工程变为兼顾环境效益和经济效益的措施, 可以星火燎原地推广开来, 适合中国国情.

2.2 从局部到大范围治理是现实可操作、可实现的途径

水污染和水生态系统的退化是从局部到大范围发展起来, 目前在许多地区已成为难以全局性改善的程度. 如前所述, 要等待全局性控制污染源, 使进入地表水系统的水都达到健康水要求, 在短期内几乎是不可能. 在这种情况下, 现实可操作、可实现的是在一定财力物力条件下从局部到大范围修复健康的水生态系统. “抓两头(污染源和饮用水源), 带中间(所有地表水域)”, 从局部到大范围, 到全流域. 这类类似于在不可能控制大范围气候条件下用建造温床的办法, 营造小气候, 获取在当地气候条件下无法种植的各种新鲜蔬菜水果. 这就要求在污染水域的某些重要局部水域, 建立保护膜(生物物理膜, Bio-physical membrane), 控制污染负荷对保护膜内生态系统的影响, 减少周围环境灾变对其的危害强度. 在该水域修复有特定功能(如饮用水源、游泳、旅游等)的健康的水生态系统, 使其能在环境灾变中持续稳定发展.

2.3 借助物理措施、建设和强化功能群的作用是在高环境压力下生态系统持续稳定的重要举措

如前所述,简单地恢复历史景观已不能适应当前和将来50年内环境压力和环境灾变的冲击.在生态系统中如不增加新的结构和子系统,将无法持续稳定地修复健康水生态系统.除了必须有生物物理保护膜外,在保护的系统中应划分和建设若干子系统.首先分析不同水生生物的净化水质功能.

挺水植物通过对水流的阻尼和减小风浪扰动使悬移质沉降,并通过与其共生的生物群落有净化水质的作用.但它主要吸取深部底泥中的营养盐,通常不或很少直接吸收水中的营养盐,而其部分残体又往往滞留湖底,矿化分解后又污染水体.所以挺水植物的功能中,有把下层底泥中的营养转移到表层的一面,不利于直接净化水质.加上收割、水位变化对其生长的影响等问题,限制了它们在净化水质中的作用.必须注意管理、收割利用和防止种群退化.

浮叶植物在一般淡水湖泊中有良好的净化水质效果,种植和收获较容易,有经济效益,和观赏效益,在一定季节可以作为重要的支撑系统.需要及时收获.

大型漂浮植物在光照和营养盐竞争上比浮游植物有优势,有些种群的耐污性很强(如凤眼莲 *Eichornia crassipes*,喜旱莲子草 *Alternanthera philoxeroides*等),已经发展了在大水面大风浪条件下种植的技术^[1],是良好的净化水质选择.浮萍生长快,许多种群能在空气中固氮,覆盖水面后与沉水植物在光照等方面有竞争,一般不宜采用.有些漂浮植物和浮体陆生植物^[6](加上浮力支撑后可水培的植物)是很好的观赏和食用植物,可在一定条件下组合应用,既有净化水质作用,又有经济效益、环境效益和观赏效益.

着生藻类和浮游藻类生长过程中都有净化水质作用.着生藻类的收集也不难,浮游藻类的收集也已发展了捕获技术^[7],在一定条件下也可因势利导予以利用,一方面净化水质,另一方面作为资源取出.

各种沉水植物是健康水生态系统的重要组成,其耐污程度和对水温、水位、水流、水质、底质等条件各有差异,要根据当地具体自然条件因地制宜、因时制宜在时间空间上予以镶嵌优化组合^[7],使各种种群在整体上互补共生适应季节变化和环境灾变.沉水植物和湖底水生植被的存在可吸附储存生物碎屑于植物根部,增加底泥表层溶氧,遏制磷的释放,阻止上层水体动力扰动向湖底的传输,减少湖底水动力交换系数,从而有效地遏制底泥营养盐向水体的释放.

螺、蚌等底栖动物可过滤悬移质,摄食生物碎屑,其分泌物有絮凝作用,螺有刮食着生藻类功能,虾和若干种类鱼类可摄食藻类、碎屑、浮游动物等.这些动物,作为健康水生态系统的补充组成,也有重要作用.

微生物,特别是氮循环细菌在水体自净能力中具有不可忽视的作用.有机物的矿化分解,氮素的气化,磷盐的沉降和固定在湖底等都与细菌的作用分不开.自然界的水生植物附近共生有多种远比自由水体中丰富的细菌群落.漂浮植物容易种植,采用耐污性强,生长快的漂浮植物作为先锋植物,不仅有植物直接吸收营养盐的作用,而且更重要的是有与其共生的细菌的作用.可以很快增加水的透明度,改善水质.

漂浮植物作为细菌的载体极为重要,但漂浮植物受气候条件影响,在有些季节难以发挥作用,因此研制人工载体和优选高效细菌种群极为重要.利用优化的人工载体培养优化的氮循环细菌,释放到自然水体,以自然生物载体、其它人工载体和底泥为二级载体,水中悬浮物为三级载体,将原来荒漠化水域中以水土界面为主的好氧-厌氧,硝化-反硝化条件扩大到水面和水

体并加强细菌浓度,从而增加系统净化能力^[9-11].利用这些措施的配合和组合,作为历史景观生态系统的补充,这是抵御环境变化和增强系统抗环境灾变能力的不可缺少的组成部分.

以饮用水源的净化系统为例,需要依靠物理工程,建设生物物理保护膜,过滤膜,导流带,构建子系统的框架,为漂浮生物在大水面上的生长提供条件,为着生藻类和氮循环细菌的繁殖生长提供条件,为观赏植物提供固定框架等.生物种群的布设要结合气候、水文、水质、地质等自然条件,考虑季节转换时系统有稳定的净化水质功能等情况,因时制宜、因地制宜地综合考虑^[7],构建不同子系统,使沿水流过程逐步将水质从Ⅳ-Ⅴ类净化到Ⅱ-Ⅲ类.

在以游泳、旅游为目标的工程中,要划分水质净化保护区、观赏区、游泳区、划船区、垂钓区等功能区.在若干区内,游人不得入内,以利生态保护.这类类似于在陆地公园的建设中需要规划出绿化区、观赏区、休闲区、道路等功能区,在若干区内游人不得入内.

2.4 借鉴历史景观和现实水生态系统发展宏观仿生学

健康的水生态系统是一个包括许多子系统的很复杂的系统.每一个子系统担负一定的功能.为了提高整体效率和完成整体功能,将子系统专业化是非常重要的.现代化工业生产中的流水作业法在某一个人和部位从事较单一的工作,然后组合为复杂的系统.这样可大大提高生产效率.每一个局部的水生态子系统可以承受一定的环境压力(输入负荷),将营养盐降低约一个数量级(或将水质改善一级).例如依靠耐污性很强的生物群落可以将重富营养化水体净化

到Ⅲ-Ⅳ类水,但无法净化到Ⅰ类水.需要将初步改善的水质输出给下一级子系统,经过若干个子系统,从例如Ⅳ类Ⅴ类水输入直至完成Ⅰ类水的输出.后者要靠适应于清洁水的生物种群来稳定实现.

例如,以氮循环细菌的除氮效果为例(图2),在经过8d后,氮浓度水平就维持在一定值上,基本随时间不变.若需要进一步降解,则需要另外的细菌种群组合.

构建怎样的水生态子系统呢?依照历史的和现存的自然界的选择是最佳选择.为此发展以组建多样性水生态系统和揭示其结构功能为主要目标的宏观仿生学有重大现实意义.

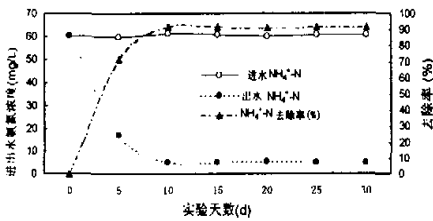


图2 载体 polyHEA/14G 固定化氮循环细菌的总氮(左)及氨氮(右)的去除率

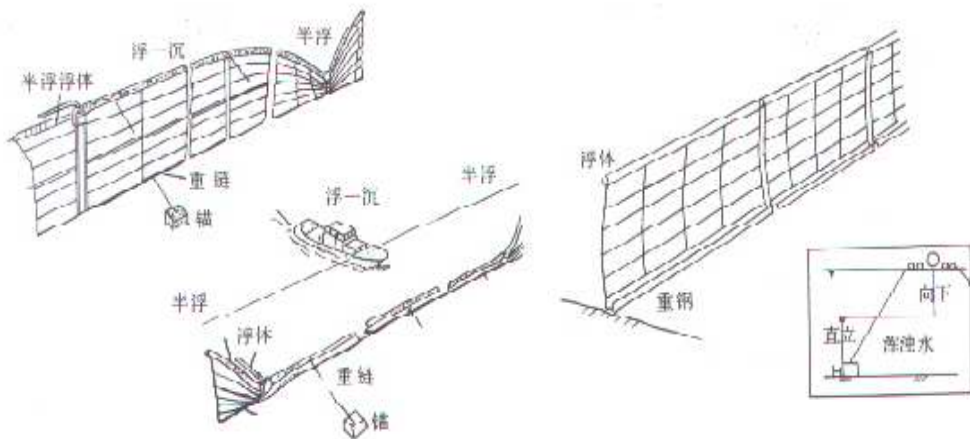
Fig. 2 Removing rate for total nitrogen (left) and ammonia nitrogen (right) by immobilized nitrogen bacteria with carrier made from polyHEA/14G cycle

3 物理生态工程(PEEN)的四项主要技术及应用实例

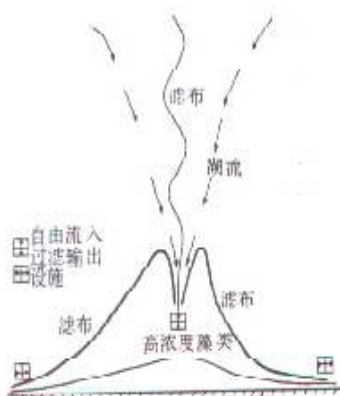
3.1 PEEN 的主要技术

在上述理论指导下,自1990年以来,经过实践再实践,发展了治理局部水域的物理生态工程(PEEN).以饮用水源区的PEEN为例,其结构见^[13].它还可获取水生生物资源和直接经济效益,发展生物环保产业(Bio-Environmental Enterprise, BEE).它主要包括四种技术:

1)能适应多种底质、风浪、潮流条件的软隔离墙过滤技术(Soft Wall Technology, SWAT)(图3a);在饮用水源区用二道过滤软隔离墙.外软墙阻隔部分悬移污染物进入,内软墙作为最终过滤膜使自来水厂获得优质水源.在二道软墙之间布设各种框架、导流和生物种群.2)水生



a 软隔离墙技术结构示意图



b 捕藻技术结构示意图



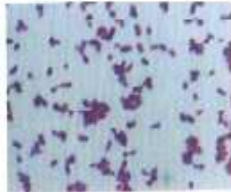
c 水生生物群落镶嵌技术写照



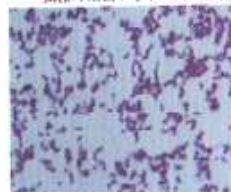
d 太湖马山 PEEN 及 TRAP 技术



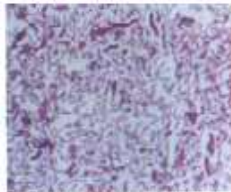
氮循环细菌1号革兰氏阳性菌



氮循环细菌2号革兰氏阳性菌



氮循环细菌3号革兰氏阳性菌



氮循环细菌4号革兰氏阳性菌

e 固定化氮循环细菌菌种显微照片

图3 物理生态工程(PFEN)的若干技术

Fig.3 Sketch map of some technologies of PFEN

生物群落镶嵌技术 (Mosaic Technology for Hydro-Dioxen, MOTHB) (图 3c)^[7]. 3) 捕藻技术 (Technology for Reducing Algae Plume, TRAP) (图 3b、3d)^[8]. 4) 固定化氮循环细菌技术 (Immobilized Nitrogen Cycle Bacteria, INCB)^[9-10] (图 3e).

3.2 应用实例——贵阳红枫湖

固定化氮细菌技术在贵阳市红枫湖温流水养殖场排污水治理工程中进行了现场实验. 红枫湖有水面 37km², 也是贵阳市饮用水的水源. 近年来, 红枫湖的水质有恶化趋势, 导致藻类快速生长. 污染源是多方面的. 其中, 位于后午湾中的二个温流水养鱼场, 通过鱼类排泄物和未被利用的饲料的分解转化, 也给湖泊造成了氮、磷污染. 红枫湖主要超标指标是非离子氮和亚硝酸盐氮, 这是两项影响人们健康的重要指标.

电厂温排水一般增温 8℃. 按计算, 电厂每天流失的余热约相当于 1000 - 3000t 煤燃烧的热量. 由于其能质低, 很难利用. 温流水高密度水产养殖是余热利用的有效方式之一. 目前两个养鱼场, 可为贵阳市提供大量优质水产品, 是贵阳市重要的副食品基地. 针对这种情况, 采取积极的治理措施, 达到利用余热水既改善水质, 又增加水产资源输出, 实现环境效益、社会效益和经济效益的同步发展是符合我国国情的最佳选择. 本项治理工程也可为红枫湖水体的全面治理提供科学依据 (图 4、5).

治理方案为以物理生态工程 (PEEN) 为主的综合治理方案. 除了改善养殖结构, 提高饲料转化率外, 主要是在二个共约 12000m² 水域内强化 PEEN 工程. 自 1999 年 9 月起, 建设若干导流软坝和水面分割带, 优化实验区的水流环境, 使形成多样性水流流态, 增加了污水在若干部分水域内的滞留时间. 导流软坝与水面分割带是着生藻类、原生生物、细菌作用的载体. 水生生物具有很好净化水质能力. 除了本身吸收水体中的氮磷外, 还能吸附悬浮物; 尤其是可成为着生藻类、原生生物以及细菌作用的载体. 经测定, 凤眼莲投放密度在 3.15 - 6.30kg/m² 时, 生长率较高, 约为 1.5kg/(m²·d), 是夏季太湖地区的 3 倍. 但综合地看, 喜旱莲子草在该区具有最佳的应用前景. 在工程区范围内, 利用水温相对较高, 氮循环细菌生长、繁殖较快的特点, 应用固定化细菌



图 4 红枫湖养殖场污染治理 PEEN 工程部分
Fig. 4 A part of PEEN for removing pollutants from the fishery ponds in Hongfeng Lake, Guiyang



图 5 红枫湖水水质监测点位置
(1: 偏山寨; 2: 腰洞; 3: 大坝; 4: 花鱼洲;
5: 后午; 6: 三岔河; 7: 焦家桥)

Fig. 5 Water quality monitoring sites in Hongfeng Lake

(INCB)技术.其载体具有的特殊微孔结构,形成的载体内外相互分异的硝化-反硝化微环境,将通常仅存在于自然水体水-沉积物界面的硝化-反硝化微环境从平面扩展到了水体立体空间,加强水体的氧化-还原能力.同时利用 INCB 技术从载体中向水体释放氮循环细菌并使其在水域中弥散.这些大量氮循环细菌在软隔离等物理载体以及植物根茎附近附着,继续繁殖,一部分随水流向下游扩散,增加整个水体中的氮循环细菌最大可能数量(Most Possible Number, MPN),提高湖湾乃至红枫湖更大水域内的净化努力.结果还表明,氮循环细菌数量在水生植物根部比周围水域平均高 1-2 个数量级,且在工程下游 2km 处的湖湾中,也增加 1-2 个数量级.经 16 个月运行,电厂冷却水出水口排入温流水养殖场的氨化细菌和反硝化细菌的 MPB 数量与工程启动时相比要增加 2 个数量级,即由原来(1999 年 10 月)的 10^2 cells/L 增加到(2001 年 4 月) 10^4 cells/L.净化池出口处的氮循环细菌 MPN 数量由原来的 10^4 cells/L 增加到 10^6 cells/L.

根据贵州省环境监测中心站资料,自工程建设起至 2000 年 12 月后午(图 5)测点总氮、总磷、非离子氨和亚硝酸盐氮分别平均降低 0.568mg/L, 0.011-0.055mg/L, 0.015mg/L 和 0.019mg/L.工程后排入红枫湖的非离子氨均 <0.02 mg/L, $\text{NO}_2-\text{N} \leq 0.1$ mg/L, 16 个月内无一次超标,而工程前的超标率达 39%(图 6).与其它湖区相比,本区各主要指标下降 4-40%,工程后 Chla 平均值仅为 $3.5\mu\text{g/L}$.至 2001 年 3 月,水质进一步改善,形成以后午为改善水质中心的分布(图 7).

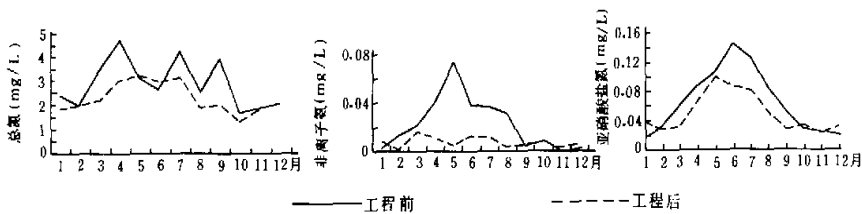


图 6 工程前后后午湖湾口总氮、非离子氨和亚硝酸盐氮的变化

Fig.6 Variations of TN, Non-ion ammonia and nitrite before/after PEEN at Houwu Bay, Hongfeng Lake

氮循环细菌在矿化分解有机质时,也将有机磷分解.无机磷盐与其它离子结合后沉降于湖底,水中磷盐也被削减.水质的改善也导致大肠杆菌的减少.据 2001 年 4 月资料,后午点的值 400 cells/L,远低于全湖平均值 1057 cells/L,尽管进入鱼池和出净化池时分别为 2500 cells/L 和 4500 cells/L.

4 结语

上述 PEEN 技术以 4M(高等水生植物, Macrophyte; 宏观仿生学, Macro-bioimitation; 微生物, Microorganism 及管理, Management)为核心在太湖梅梁湾马山、五里湖、贵阳红枫湖、南京莫愁湖等地已经历 11 年试验改进,可以在滞留时间为 7-8d 内将水质由 IV、V 类改善为 II、III 类^[11].以太湖为例,首先在原有饮用水源区,例如五里湖中桥水厂水源区约 1km^2 内修复健康水生态系统,保证供应约 50 万居民优质饮用水.随后在历史上有沉水植物的湖湾(例如五里湖湾约 5km^2)逐步修复以沉水植物为主的水生植被和健康水生态系统,作为游泳、旅游基地.在梅梁湾东西岸边几个自来水厂取水口,建设净化水质工程及捕藻技术(TRAP),这样在夏季太

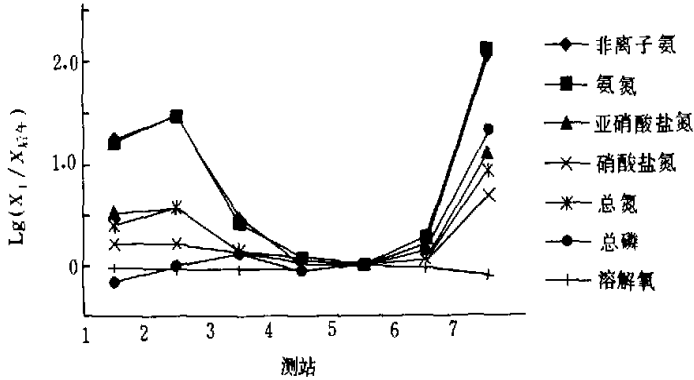


图7 红枫湖水质,以 PEEN 工程下游后午湾为基准,后午湾优于其它测点,2001 年 3 月

Fig. 7 Water quality in Hongfeng Lake in relative scale based on Houwu Site in March 2001

湖流域盛行偏南风作用下,太湖湖面生长的藻类逐步富集到梅梁湾,不论是偏东或偏西风,在取水口辐合湖流作用叠加下,藻类能被逐步富集到自来水厂的取水口附近的 TRAP 内,用水泵吸出水体供进一步加工。在入湖河口用 PEEN 使人湖水质达Ⅲ类,例如在闾江口建设全年净化水质的温床式塔形 PEEN,运用凤眼莲及 INCB 技术全年净化水质,并作为冬季保苗温床,在 5-10 月在梅梁湾逐步扩大种植凤眼莲。根据凤眼莲的生长率,不计 INCB 作用,在 120d 内,33km²水面上可吸收约 3150t 氮,即可将全年滞留在(纯输入)太湖中的氮和大部分磷取出水体。将这些凤眼莲机械化收集,充分利用太阳能风能塔群式去湿,运用微生物技术、真空技术等工厂化加工为牛等动物的适口饲料及肥料,从而获取直接经济效益,发展生物环保产业(BFE)。这样(以太湖流域为例),与流域上污染源控制相结合,再现山清水秀,人杰地灵的目标是可以在不很长的时间内实现的。

参 考 文 献

- 1 濮培民等. 改善太湖马山自来水厂水源区水质的物理-生态实验研究. 湖泊科学, 1993, 5(3): 171-180
- 2 PU Peimin, HU W, YAN J, et al. A physico-ecological engineering experiment for water treatment in a hypertrophic lake in China. *Ecological Engineering*, 1998, 10: 179-190
- 3 濮培民, 王国祥, 胡春华等. 底泥疏浚能控制湖泊富营养化吗? 湖泊科学, 2000, 12(3): 269-279
- 4 金相灿等. 中国湖泊环境(第二册). 北京: 海洋出版社, 1995. 120-135
- 5 科学时报, 2000-06-09
- 6 ZOU Gaoyan, SONG Xiangfu, WU Weiming, et al. Study on purification of culturally-eutrophicated water bodies by terrestrial higher plants planted on floating beds. *J of Lake Sciences* (湖泊科学), 1998, 10(Suppl.): 539-548
- 7 王国祥, 濮培民, 张圣照等. 用镶嵌组合植物群落控制湖泊饮用水源区藻类及氮污染. 植物资源与环境, 1998, 7(2): 35-41
- 8 PU Peimin, et al. A "Jellyfish Engineering Experiment" for purifying water quality in large lakes. Proceedings of the 7th International Symposium on River and Lake Environments, Japan, Oct. 1-3. *Rep Suma Hydrobiol*, 1994, 9: 149-153
- 9 王国祥, 濮培民, 黄宜凯等. 太湖水生态系统中氮循环细菌分布. 湖泊科学, 1999, 11(2): 160-170
- 10 李正魁, 濮培民. 秋冬季环境下固定化氮循环细菌净化湖泊水体氮污染动态模拟. 湖泊科学, 2000, 12(4): 321-326
- 11 濮培民, 胡维平, 逢勇等. 净化湖泊饮用水源的物理-生态工程实验研究. 湖泊科学, 1997, 9(2): 150-157
- 12 李正魁, 濮培民. 净化湖泊水体氮污染的固定化硝化-反硝化菌研究. 湖泊科学, 2000, 12(2): 119-123
- 13 李正魁. 固定化细菌技术及其在物理生态工程中的应用. 中国科学院南京地理与湖泊研究所博士学位论文, 2000

Degradation of Healthy Aqua-ecosystem and Its Remediation: Theory, Technology and Application

PU Peimin WANG Guoxiang LI Zhengkui HU Chunhua CHEN Baojun
CHENG Xiaoying LI Bo ZHANG Shengzhao FAN Yunqi
(*Nanjing Institute of Geography & Limnology, CAS, Nanjing 210008, P. R. China*)

Abstract

Being the basis of human society, freshwater aqua-ecosystem is suffering of gradual degradation in many regions of the world. Most fresh water lakes and river net in plain are shallow waters in China. There are abundant higher aquatic plants and associated fish, shrimp, shellfish, mussel and other macro-hydroorganisms. Possessing prolific biodiversity, these waters were selected as drinking water sources for many cities and towns in the history. But at present, these clear waters in most cases have been degenerating into "desert-waters" in defect of macrophytes but dominated by phytoplankton and other microorganisms, along with the increase of pollutant loading.

The loading of pollutions into surface water systems was increased gradually in comparison with that before a couple of decades ago. How to restore the degenerated aquaecosystem for a sustainable and healthy aquaecosystem under enhanced pollutants loading is the issue of great theoretical and practical importance. The water quality problem is a problem of ecosystem. The target, measures, approaches, key technologies and the feasibility for remediation of the aquaecosystem were reported in this paper according to the research and experiment results on Physico-Ecological Engineering(PEEN) in fresh waters of China since 1990^[1]. The main conclusions are as follows:

1) The main aim for harnessing the surface waters is remediation for sustainable healthy aquaecosystems.

2) The main measures for harnessing the surface waters are to carry out the Physico-Ecological Engineering-(PEEN) and Bio-Envioronmental Enterprise-(BEE) in combine with harnessing the pollution sources.

3) The main approach for realizing the aim is "sparks exploding" starting from local to larger areas and to the whole catchment.

4) The key momentums for realizing the aim are 4M: Macrophyte, Macro bio-imitation, Microorganism, and Management.

5) The beautiful and bright future with green mountains, clean waters, high level waters, high level civilization and abundant resources in harmony development of social economy and environment might be realized come-at able.

Key Words Healthy aqua-ecosystem, remediation of healthy aqua-ecosystem, lake eutrophication control, Physico-Ecological Engineering(PEEN)