

提高水体净化能力控制湖泊富营养化

濮培民¹, 李正魁², 王国祥³

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 2. 南京大学环境学院, 南京 210093; 3. 南京师范大学地理科学院, 南京 210097)

摘要:建立了湖泊污染物动力学方程, 根据我国湖泊和美国 Okeechobee 湖资料, 确定了控制藻类暴发的总磷阈值为 0. 035mg/L, 总氮阈值为 0. 350mg/L(滇池)和 1. 050mg/L(太湖); 用实测资料, 计算得到需要削减的外污染源滇池为总磷、总氮各 78%, 太湖为总磷 69%、总氮 56%。提出通过提高水体净化能力可以控制湖泊富营养化的理论依据和如下技术路线: 提高湖泊净化率, 使其超过输入的污染率, 在湖内实现浓度低于控制藻类水华暴发所需要的磷、氮阈值; 因地制宜综合运用太湖、巢湖、滇池等一类大、中型湖泊, 加强管理, 就可以在占湖泊 7%(滇池)和 4%(太湖)的湖面上, 依托科学布设控制其生长的凤眼莲, 将其规模化地加工为有益产品, 从而有效地去除湖泊中的营养盐, 将水体综合净化率比现有净化率在滇池提高 4. 6 倍, 在太湖提高 2. 1 倍, 实现控制湖泊富营养化目标, 并同步地在约 3~4 倍相应面积上修复健康水生态系统。

关键词:物理生态工程; 固定化氮循环细菌; 水体净化能力; 修复健康水生态系统; 太湖; 滇池

文章编号: 1000-0933(2005)10-2757-07 中图分类号: Q178, X171, X52 文献标识码: A

Controlling eutrophication by enhancing purification capacity in lakes

PU Pei-Min¹, LI Zheng-Kui², WANG Guo-Xiang³ (1. *Nanjing Institute of Geography & Limnology, Academia Sinica, Nanjing 210008, China*; 2. *College of Environmental Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China*; 3. *School of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10): 2757~2763.

Abstract: To determine the potential for controlling eutrophication in lakes by controlling external pollutant loadings and through in-lake interventions, a dynamic model for total phosphorus (TP) and total nitrogen (TN) was derived. Based on data of Chinese lakes and of L. Okeechobee in the USA the threshold concentrations, i. e. concentrations above which algae blooms are formed, were determined as 0. 035 mg/L for TP for both lakes and 0. 35 mg/L for TN in Dianchi Lake and 1. 050 mg/L for TN in Taihu Lake. According to the observed data the percentages of TP and TN loading that exceed the volume for maintaining the concentration in the lake that is lower these thresholds and therefore would require nutrient control to prevent algae blooms are 78% (both for TP and TN) for Dianchi Lake in 1995, and 69 % for TP and 56 % for TN for Taihu Lake in 1987~1988. However, the financial requirements for construction of wastewater treatment plants and sewer collection networks, and for reducing non-point source nutrient loadings from agriculture are immense and the timespan required to

基金项目:中国科学院、江苏省科技厅(BS90077)、无锡市自来水公司和马山自来水厂、水利部太湖流域管理局、国家科技部、欧盟科技部(CII*-0094[DG 12 HSMU]、香港理工大学、日本河北泻湖沼研究所、南京大学 985 一期工程、南京师范大学 211 工程和浙江大学环境资源学院等单位资助项目

收稿日期:2004-10-06; **修订日期:**2005-05-05

作者简介:濮培民(1936~), 男, 江苏无锡人, 研究员, 主要从事湖泊生态环境工程研究. E-mail: pupm1@yahoo. com; pupm@public1. ptt. js. cn
致谢:本文是在自 1990 年以来实践物理生态工程基础上的总结参加工作的有颜京松、焦春萌、窦鸿身、张圣照、张利民、逢勇、胡维平、魏阳春、李波、陈宝君、成小英、钱军龙、范云崎、胡春华、张文华等同事; 丹麦的 Eric Jorgenson 教授, 香港理工大学蔡宏教授、李向东博士、日本河北泻湖沼研究所定塚谦二教授、大串龍一教授、高桥久博士、泽野博士、大馆小夜子女士、藤木正範先生等参加和支持了研究工作; 加拿大 Edwin D. Ongley 博士润色英文摘要, 在此谨表谢意

Foundation item: The project was financially supported by Chinese Academy of Sciences and Jiangsu Province Bureau of Science & Technology (BS90077); State Committee of Science & Technology, China, and Department of Science, European Community (CII*-CT93-0094 [DG 12 HSMU]); Hong Kong Polytechnic University, Japan Kahokugata Lake Institute, 985 Engineering of Nanjing University, 211 Engineering of Nanjing Normal University and College of Environment and Resources of Zhejiang University

Received date: 2004-10-06; **Accepted date:** 2005-05-05

Biography: PU Pei-Min, Professor, mainly engaged in aquatic ecosystem & environmental engineering. E-mail: pupm1@yahoo. com; pupm@public1. ptt. js. cn

achieve beneficial results in the receiving lake in a catchment as large as Taihu, Chaohu and Dianchi lakes, is very long. Furthermore, the benefits are unlikely to extend to the entire lake for a very long period of time, if ever, for middle to large-sized lakes. It is unrealistic to consider reduction of nutrient loadings to historical, natural levels to achieve natural remediation to a healthy aquatic state. Also, the nutrient loading contained in the lake sediments is immense and not amenable to technical solutions such as dredging, or chemical treatment to permanently lock the nutrients in the sediments. Therefore, this paper proposes a bio-engineering approach to eutrophication management which uses a variety of in-situ techniques which enhance the self-purification capacity of the lake. The purification capacity in a water body can be cost-effectively enhanced to the level at which the nutrient concentrations are lower than the threshold concentration that produces algae blooms. Bio-engineering techniques use combinations of solar energy, wind energy and related waves and currents, together with selected aquatic plants and other aquatic species to improve the bio-productivity in the lake. The biological products, in turn, have economic value and are removed from the lake for beneficial purposes. The technologies for immobilized nitrogen cycle bacteria for reducing TN, the macro-bionics principles for mosaic bio-communities, the technology for remediation of the healthy aquatic ecosystems in local areas, the desiccation technology for aqua-plants by solar and other natural energy, are referred to collectively as Physical-Ecological Engineering (PEEN). This approach can be utilized for large and middle sized lakes, such as Taihu Lake, Chaohu Lake, Dianchi Lake, etc. in China. Small parts of the total lake water surface (7 % for Dianchi Lake; 4 % for Taihu Lake), are required for culturing water hyacinth through an optimized design and scientifically controlled management scheme. Subsequently the biomass is removed and processed into an economic beneficial resource. Under these conditions the purification capacity of the lake would increase about 4.6 times for Dianchi Lake and 2.1 times for Taihu Lake. The targets for controlling eutrophication and restoration of a healthy aquatic ecosystem are for areas that are 3~4 times that of the water hyacinth cultured areas in these lakes and therefore allow for algal management in areas of water intakes, recreational areas, etc.. The benefits of these measures are achieved over a short period of time, and are targeted at designated areas that require immediate protection. The cost is estimated to be much less than the equivalent costs of land-based control, and can be partly recovered from the financial returns from selling the products of water hyacinth and mollusks. Additionally, these measures create employment for the long-term operation of these measures. A framework is presented for the various steps required for the control of eutrophication in Dianchi Lake and Taihu Lake.

Key words: physical-ecological engineering; immobilized nitrogen cycle bacteria; purification capacity of waters; remediation of health aquaecosystem; Taihu Lake; Dianchi Lake

陆地生态系统产生的非生物、生物、生物残体、溶解的、悬移的和推移的物质,随水流汇集到地表水系统,特别在流速缓慢的湖泊滞留、转化;其中,水中以总氮、总磷为主要特征的营养盐指标,随时间推移会增加。这是自然富营养化过程。生物过程主要通过光合作用,将水溶营养盐转化为生物量,经过食物链网的转化,形成具有丰富生物多样性的水生态系统。部分生物残体经细菌分解,又转化为无机物。在此物质循环过程中,部分氮素以气态逸出水体,部分矿物质、生物残体沉积在湖底。这是水体自然净化过程。人类活动加剧了物质从陆上和大气向水中的输送过程。森林砍伐、土地耕作、化肥农药使用、畜牧业发展等加重了土肥流失,加上生活污染和工业污染的压力,使许多水体承纳了数倍、数十倍、乃至更高倍数于历史水平的环境污染压力,历史上形成的健康水生态系统逐渐退化。以氮磷浓度高、藻类密度大、可形成藻类水华、透明度低为主要特征的湖泊富营养化,成为困扰我国突出的生态环境问题。控制外污染源无疑是控制富营养化的最重要措施。用“关、停、并、转、治”控制工业污染及推行禁用含磷洗衣粉、建设污水处理厂等措施已执行多年;农业污染的治理已在研究和推开;疏浚底泥也已在数平方公里的湖泊或湖区、河道(如滇池、巢湖、南京玄武湖、杭州西湖、太湖流域 14406 km 河道等)实施;用较清洁水来稀释和冲洗污染水域已有相当规模的实施案例(如用望虞河调长江水清太湖);用鱼类控制藻类水华在武汉东湖实施了多年。但总起来看,目前我国水体生态环境恶化的趋势远未得到控制,任务还十分艰巨。濮培民等^[1]指出充分利用湖泊水面上的太阳光热等能源,将水中营养物高效地转化为生物资源,并实现其规模化利用,将物理生物防浪消浪、提高水体透明度、遏制藻类、固定化氮循环细菌、宏观仿生生物镶嵌、局部修复健康水生态系统等技术及低能耗干燥技术等通称为物理生态工程技术^[1]。

美国佛罗里达州的奥凯丘比(Okeechobee,简称 OK 湖)湖的水面积 1730km²,平均水深 2.7m,流域面积 12394km²,其水面面积略小于我国太湖(2338km²),容积则与太湖($4.676 \times 10^9 \text{m}^3$)相当,流域上的人口密度仅 42.2 人/km²,是太湖流域人口密度 1079 人/km² 的 1/25。用美国国家环保局 EPA-2000 年模式计算,用现有常规方法加强治理,将总磷输入负荷由当前的 460t/a,

削减到 191t/a(即需削减掉 58.5%),来控制该湖富营养化尚需 200a^①,可见治理难度之大。目前我国的太湖、巢湖、滇池的营养盐水平、污染负荷、流域内的人口密度均比 OK 湖高出许多倍,探讨控制湖泊富营养化新途径更为迫切。本文依据对湖泊整体的污染物质动力学方程,以滇池和太湖为例,讨论通过减少外污染源控制湖泊富营养化的可能性,并结合我国情况,提出通过提高水体净化能力控制湖泊富营养化的理论依据和技术路线。

1 湖泊污染物质动力学方程

对整个湖泊来讨论营养盐 S (总磷或总氮分别用右上角的 N 或 P 表示相应的量; S^P, S^N)平均浓度的动力学。设: A, A_{wh} 分别为湖泊水面积和水生植物面积; H, V, τ 分别为湖泊平均水深,容积,滞留时间; $F_{in}, S_{in}, L_{in}=F_{in} \times S_{in}$ 分别为地表径流输入量,其营养盐浓度,及污染负荷; S_p 为降水量 P 中包括干沉降折算在内的浓度, $L_p=P \times S_p$ 为大气沉降输入; B_f 为通过水产品输出的营养盐; α_b, α_n 为营养盐净化率(TP 或 TN 在单位浓度下单位面积水柱中 1 a 内的沉降量 α_b 或氮素气化率 α_n); D_{wh}, α_{wh} 为(单位面积上,并最终被取出的)水生植物生物量及其营养盐吸收率, t 为时间,在讨论年平衡中,单位为 a。

按质量守恒原理,对全湖平均的 S ,有方程:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = L_m + L_p - B_f - [F_{out} + (\alpha_b + \alpha_n)A]S - \alpha_{wh}A_{wh}D_{wh}$$
 (1)

或改写为:
$$\frac{\partial S}{\partial t} = \beta - \alpha S$$
 (2)

其中:
$$\beta = \left(\frac{L_{in} + L_p - B_f}{V} - \frac{\alpha_{wh}}{H} \frac{A_{wh}}{A} \right), \quad \alpha = \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\tau} + \frac{\alpha_b + \alpha_n}{H}, \quad L_{in} = F_{in}S_{in}, \quad L_p = PS_pA$$
 (3)

当 α, β 为常数时方程(2)的解为:
$$S = \frac{\beta}{\alpha} + C \exp(-\alpha t), C \text{ 为常数}$$
 (4)

在 S 不随时间变化的平衡状态下, $S_{balance} = \beta/\alpha$, 式中, $S_{balance}$ 为与水体污染率和净化率相平衡的污染物浓度。

β 是单位容积水体承受的年污染负荷,即水体污染率,其中凤眼莲等水生植物生长并取出即相当于减少外污染源; α 是单位容积水体在年内削减污染率的倍数,即水体净化率。

2 控制湖泊富营养化的总磷总氮阈值

湖泊营养类型的划分取决于多种参数,学术界存在多种标准。磷是主要控制因素。欧美学者定义贫营养型湖泊的总磷为 < 0.010mg/L,中营养型湖泊为总磷介于 0.010~0.020mg/L 之间,富营养化湖泊的总磷标准是超过 0.020mg/L^②。我国太湖评价时将富营养湖泊定为总磷>0.110mg/L。据美国 OK 湖资料^①有 TN/TP=30,且湖中总磷的季节变幅很大,年平均总磷与当年总磷负荷的相关很差,年内出现高浓度叶绿素频次与年平均总磷相关也差(图 1);说明通过总磷外污染负荷并不能直接影响当年湖内总磷浓度和藻类水华,其影响仅是趋势性意义上的。从图 1 上可估计,总磷年平均浓度 < 0.04mg/L 时基本无藻类水华,考虑到年内变化幅度较大,故控制湖泊富营养化的总磷阈值取为 $S_{a,c}^P = 0.035\text{mg/L}$ 。

根据实际滇池水中总氮、总磷的比值接近 10 的情况,滇池总氮控制阈值为 $S_{a,c}^N = 0.350\text{mg/L}$ 。

对太湖取与 OK 湖类似的 TN/TP=30(太湖 1987~1988 年平均为 34.5),比太湖富营养化评价标准(1.100mg/L)略低的值为 $S_{a,c}^N = 1.050\text{mg/L}$ 。

根据太湖实验资料^[2],夏季凤眼莲(*Eichronia crassipes*)的 TP 的吸收率为 $\alpha_{wh}^P = 0.13\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{d})$, TN 吸收率为 $\alpha_{wh}^N = 0.79\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{d})$ 。

3 削减污染负荷控制湖泊富营养化分析

以滇池 1995 年为例^③, $L_{in}^P + L_p^P = 1021\text{tTP/a}$; $L_{in}^N + L_p^N = 8981\text{tTN/a}$; $S^P = 0.160\text{mg/L}$; $S^N = 1.650\text{mg/L}$; $A = 300\text{km}^2$; $V =$

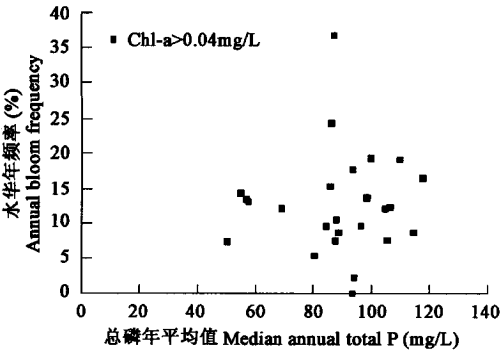


图 1 OK 湖年平均总磷与年内出现藻类水华频率相关^①
Fig. 1 Relation between the median annual total P and annual bloom frequency^①

① Blasland, Bouck & Lee. Development of Alternatives for the Lake Okeechobee Sediment Management Feasibility Study, Technical Report, South Florida Water Management District, 2001

② Progressive AE of Charter Township of Meridian, Lake Lansing 2003 Water Quality Monitoring Report, 2004

③ 滇池流域水污染防治“九·五”计划及 2010 年规划,经中国国务院国函[1998]75 号文批复

1.29×10⁹m³;H=4.3m;并根据滇池水产资料,1995 年滇池取出的鱼类约 5000 t^①,参考文献^[3]中的转换系数,可得通过水产输出滇池的 N、P 约为 100 t 和 10 t;故取 B_f^N=100t/a, B_f^P=10t/a。

可以把经过凤眼莲、固定化氮循环细菌(Immobilized Nitrogen Cycle Bacteria INCB)^[1,4,5]等湖内新增加的净化作用考虑在内的水体净化率定义为水体综合净化率:

$$\bar{\alpha} = \beta / S_{a,c}.$$

(5)

它比现有水体净化率提高的倍数:

$$\gamma = S_{balance} / S_{a,c}.$$

(6)

据此,在平衡情况下,可得到表 1、表 2。由此,滇池需要减少外污染负荷总磷 790 t/a,总氮 7001 t/a,是径流输入负荷的 78%,这在目前污水处理厂和工农业污染处理技术条件下,即使用高昂的投入也无法在近期实现。事实上,尽管有数十亿元治理投入,但滇池外污染源输入仍增加极为迅速,据报告^②1988 年为 TN=4197t, TP=338t;到 1995 年为 TN=8981t, TP=1021t,是 1988 年的 2.1 和 3.0 倍。要想逆转这一增长趋势还非常困难。

表 1 滇池(1995 年)及太湖(1987~1988 年)总磷平衡

Table 1 Total phosphorus Balance for Dianchi Lake (1995) and Taihu Lake (1987~1988)													
项目 Item	输入量(t/a) Input quantity					输出量(t/a) Output quantity				储存于水体 Store in Water Body			R*
	地表径流 Surf. inflow	大气沉降 From atmosphere			总量 Total	沉积 Sedimentation		水产 Aqua biomass production	流出 Outflow	总量 Total	浓度 Concent. (mg/L)	含量 Quant	
		湿 Wet	干 Dry	速率 Rate		沉积量 Quant.							
目前 present	滇池	1018	1	2	1021	19.4	931	10	80	1021	0.160	206	790(78%)
目标 Target	Dianchi Lake				231	19.4	204	10	17	231	0.035	45	
目前 present	太湖	1895	60	33	1988	5.08	820	126	1042	1988	0.069	323	1306(69%)
目标 Target	Taihu Lake				682	5.08	416	126	140	682	0.035	164	

R 需要减少输入的污染负荷或通过取出水生生物的量及该量在地表径流中的%Required reduction or output by aquatic biomass and occupying % in surface inflow;下同 the same below

表 2 滇池(1995 年)及太湖(1987~1988 年)总氮平衡

Table 2 Total nitrogen balance for Dianchi Lake (1995) and Taihu Lake (1987~1988)														
项目 Item	输入量(t/a) Input quantity					输出量(t/a) Output quantity					储存于水体 Store in Water Body			R*
	地表径流 Surf. inflow	大气沉降 From atmosphere			总量 Total	沉积 Sedimentation		排入大气 Into air	水产 Aqua biomass production	流出 Outflow	总量 Total	浓度 Concent. (mg/L)	含量 Quant	
				速率 Rate		沉积量 Quant.								
		湿 Wet	干 Dry											
目前 Present	滇池	8956	18	7	8981	16.3	6443 (80%)	1611 (20%)	100	827	8981	1.659	2128	
目标 Target	Diamchi Lake				1980	16.3	1368 (80%)	324 (20%)	100	170	1980	0.350	451	7001 (78%)
目前 Present	太湖	24926	2759	421	28106	0.56	2484 (80%)	621 (20%)	3334	21667	28106	2.391	11176	
目标 Target	Taihu Lake				14224	0.56	1100 (80%)	275 (20%)	3334	9515	14224	1.050	4910	13882 (56%)
目标 Target					16973	1.68*	1100 (27%)	3024 (73%)	3334	9515	16973	1.050	4910	11133 (45%)

* 假定采用 INCB 技术提高氮素气态逸出并使氮素净化速率提高 3 倍下的值,主要增加排入大气的量 Enhanced release of nitrogen in gaseous state to 3 time by using Immobilized Nitrogen Cycle Bacteria(INCB) technology

由表可知,目前湖底不是污染源而是汇,它吸收的总磷达 931t/a,总氮达 6443t/a。再次证明疏浚底泥无法控制湖泊富营养化的论据^[6]。

对于太湖^[7]需要减少外污染负荷总磷 1306t/a,总氮 13882t/a,分别占径流输入负荷的 69%和 56%。按人均污水处理厂基

① 滇池——昆明的心灵之痛(7). <http://www.sina.com.cn> 2004/11/16

② 昆明市环境科学研究所. 滇池富营养化研究,1992

建、管网费 1000~2000 元计,太湖流域约 4000 万人需要 400~800 亿元污水治理建设费,而其尾水指标劣于地表Ⅲ类水 20~30 倍。按此途径显然无法控制太湖富营养化。更为严峻的是,太湖水面大气沉降总氮占削减量的 23%,而其氮、磷浓度已超过湖泊Ⅱ类水标准。若用放养凤眼莲并使用固定化氮循环细菌技术提高除氮率 3 倍后,它在太湖生长期为 150d 内吸收上述总磷、总氮,分别仅需要 67km² 和 94km² 水面,小于太湖水面的 4%。这样,将太湖水体综合净化率 $\bar{\alpha}$ 提高 $\gamma=1.97$ 倍(TP)和 2.28 倍(TN),就可将太湖 TP、TN 浓度控制在发生藻类水华的阈值以内。

计算表明(表 1、2),滇池的总氮、总磷单位容积水体污染率(791.5t/km³ 及 6962.0t/km³)均大于太湖(425.1t/km³ 及 6010.7t/km³),特别磷的容积污染率要大 1.86 倍,故其富营养化进程发展更快,更严重。值得注意的是太湖的氮素净化率很低,这可能是由于太湖宽阔而浅,仅 2m 水深,容易复氧,反硝化需要的厌氧条件较差。由于湖面降水中 N/P 大,达 46,而湖中氮素净化率又低,致使太湖 N/P 达 34.5。与太湖类似的美国 OK 湖也有类似情况。这是否是大型浅水湖泊普遍情况,值得注意。滇池则有 N/P=10。研究影响水体净化率的因素及其变化规律,运用 INCB 技术降低氮素,特别是氨氮,具有重要理论和实际意义。

4 提高水体净化能力控制湖泊富营养化分析

由(3)式可知,放养凤眼莲吸收营养盐的作用与削减外污染源起着同样作用。据测定,以蓝藻为优势种群的藻类在 1992 年夏季的生长率为 6.2g/(m²·d)。同样条件下的凤眼莲生长率为 0.5kg/(m²·d),可折合出凤眼莲的富集氮、磷的效率比藻类要高出 13~21 倍。凤眼莲远比藻类更容易收集取出水体。放养凤眼莲可提高太阳能利用率,提高湖泊原初生产力,提高水体净化能力,遏制藻类生长,提高透明度,支撑修复生态系统。例如为控制滇池富营养化需要减少的总磷、总氮约相当于放养凤眼莲 20km² 和 30km²,在滇池生长期为 300d 所吸收的量;若采用 INCB 技术提高湖面降减 TN 率 1 倍,则仅需放养凤眼莲 22km²(占滇池水面 7%),并及时取出利用,就可提高净化率(约 4.6 倍,修复清秀水体历史景观,污染资源化,减少氮磷沉降和向下游输移量达 79%,并保障滇池及其下游安全饮用水源,其经济生态综合效益是其它措施难以替代的。这是近期可以实现的途径。

目前存在以下问题:(1)若不能控制,凤眼莲大量生长后到处飘游影响交通航运;(2)在近岸处集聚,大面积覆盖可导致沉水植物死亡,水中缺氧和动物死亡;(3)若不及时取出运走,会造成二次污染;(4)如何规模化收集取出,将其(含水量达 95%)干燥并有经济效益地加工利用是个难题。需要开发新技术解决这些问题。

5 提高水体净化能力与生态修复同步的技术

自 1990 年来发展的物理生态工程(Physiccal-Ecological Engineering-PEEN)^[1]为解决上述问题提供了新技术。

(1)采用软隔离带技术,可以控制凤眼莲在一定范围内生长,按一定宽度和间隔布设“斑马线”式凤眼莲生长带(约占 1/4~1/3 水面),使其覆盖面积成为软的防浪消浪带,按照宏观仿生原理,自然和人工管理相结合,在凤眼莲放养区影响范围内促进恢复沉水植被,提高水体净化能力、遏制藻类生长、遏制底泥释放营养盐、增加水中溶解氧,发展生物多样性;

(2)利用 INCB 技术,借助凤眼莲等水生植物载体,强化和扩大微生物净化水质作用;

(3)用专门技术放养螺蚌,净化水质、提高透明度、遏制藻类生长,获取部分经济效益;

技术路线如图 2 所示。最后是规模化、集约化收集、加工凤眼莲,开发其经济生态价值。

6 资源利用和实施方案

凤眼莲是很好的动物饲料,可制造沼气、造纸、用作肥料等,对这些已做过研究并有许多专利,但难以实用化。其规模化收集、加工、干燥技术及开发新的经济、生态价值使能实际应用等问题成为关键难点。这些均已突破,将另文发表。

在滇池的实施方案,可以在其外海东北角(图 3),用长约 15 km 的软隔离带围出一块水域(外海约 22km²,草海约 8km²,合计约 30km²)。将此区域建设为吸纳和净化昆明市主要污水的增强净化功能区(“滇池肾”),使滇池流域 3/4 的水流入此区域内

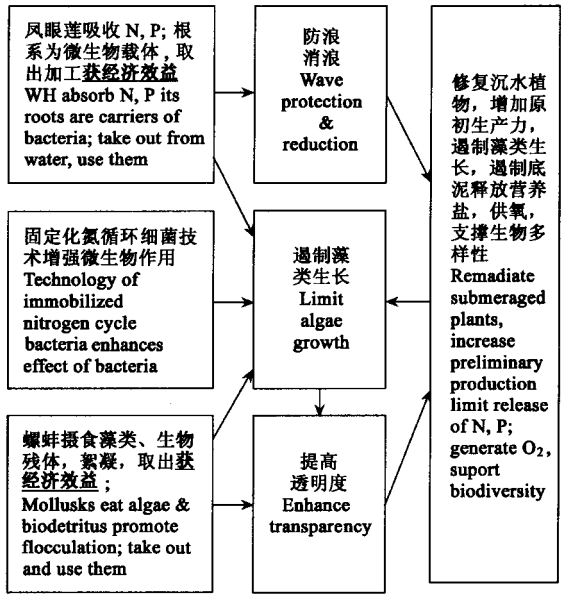


图 2 以凤眼莲、螺蚌、氮循环细菌为支撑修复以沉水植物为主导系统的健康水生态系统技术路线框图

Fig. 2 Scheme of the technical approaches of remediation for the health aquaecosystem supported mainly by aquatic plants with utilization of Waterhyacinth, immobilized nitrogen cycle bacteria and mollusks

Sciences,2001,**13**(3):193~203.

[2] Du H S, Pu P M, Zhang S Z, *et al.* An experimental study on culture of *Eichhornia crassipes* (Mart) Solms on open area of Taihu Lake, *J. of Plant Resource and Environment*, 1995, **4**(1): 54~60.

[3] Yang J X. The ab extra and indigenious fishes in Yunnan: Effective mode, extent and other issues. In:WUANG Song,eds. *et al. Protection on the Biodiversity in China*(2). Beijing:Chinese Environmental Science Press, 1996. 129~138.

[4] Li Z K &. Pu P M Dynamic modeling of purifying nitrogen pollutant by immobilized nitrogen cycle bacteria during Autumn and Winter seasons, *J. of Lake Sciences*,2000, **12**(4):321~326.

[5] Wang G X, Pu P M, Huang Y K, *et al.* Distribution and role of denitrifying, nitrifying, nitrosation and ammonifying bacteria in the Taihu Lake, *Chinese Journal of Applied &. Environmental Biology*,1999, **5**(2): 190~194.

[6] Pu, P M, Wang G, Hu C, *et al.* Can we control eutrophication by dredging? *J. of Lake Sciences*, 2000, **12**(3): 269~279.

[7] Huang Y, Fang C, Pu P,*et al.* *Aquatic Environment and Pollution Control in Taihu Lake*. Beijing:Science Press, 2001.

[8] Dianchi Lake——A Hyper-Eutrophic Lake in China, in *Tropical Eutrophicated Lakes: Their Restoration and Management*. Oxford and IBH Publ. Co. Pvt. Ltd. (New Delhi), Science Publishers Inc. USA, March, 2005.

参考文献:

[1] 濮培民,王国祥,李正魁,等. 健康水生生态系统的退化及修复——理论与技术及应用. 湖泊科学,2001,**13**(3):193~203.

[2] 龚洪身,濮培民,张圣照,等. 太湖开阔水域风眼莲的放养实验. 植物资源与环境, 1995, **4**(1), 54~60.

[3] 杨君兴. 云南的外来鱼类和土著鱼类:影响的方式和程度及相关问题研究. 见:汪松、谢彼德、解焱编. 保护中国的生物多样性(二). 北京:中国环境科学出版社,1996. 129~138.

[4] 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.

[5] 王国祥,濮培民,黄宜凯,等. 太湖反硝化、硝化、亚硝化及氨化细菌分布及其作用. 应用与环境生物学报,1999,**5**(2):190~194.

[6] 濮培民,王国祥,胡春华等,疏浚底泥能控制湖泊富营养化吗?, 湖泊科学,2000,**12**(3):269~279.

[7] 黄漪平,范成新,濮培民,等,太湖水环境及其污染控制. 北京:科学出版社, 2001.

.....

《西北农林科技大学学报(自然科学版)》2006 年征订启事

《西北农林科技大学学报(自然科学版)》是国内外公开发行的综合性农业科学学术期刊,创刊于 1936 年,是西北地区创办最早的农业学术期刊,其前身是《西北农业大学学报》。本刊立足学校,面向社会,主要刊登农业科学、林业科学、植物保护、资源与环境科学、园艺科学、动物科学与动物医学、食品科学、农业水利与建筑工程、农业机械与电子工程、生物技术与基础学科等方面具有创新性或适用性的学术论文、研究简报、文献综述,以及反映最新科研成果的快报。读者对象为国内外农林科技工作者、高等院校教师、研究生和农林管理干部。

本刊为中国自然科学核心期刊、全国综合性农业科学核心期刊和中国科学引文数据库核心期刊,论文被国内外多家权威性数据库和文摘期刊固定转载和收录。在促进学术交流、发展学科理论、推动科技进步等方面做出了较大贡献。

《西北农林科技大学学报(自然科学版)》为月刊,A4,160 页,每月 25 日出版,每期定价 10 元,全年 120 元。邮发代号为 52-82,全国各地邮局均可订阅,亦可直接通过本刊编辑部订阅。国外总发行为中国出版对外贸易总公司。

编辑部地址:陕西杨凌 西北农林科技大学西农校区 40 号信箱 邮编:712100 电话:029-87092511

E-mail: xb2511@yahoo.com.cn; xb2511@yeah.net

网址:http://XBNY.chinajournal.net.cn;http://xbnydxxb.periodicals.net.cn