

富营养化水体生物净化效应的研究进展*

全为民¹ 沈新强¹ 严力蛟²

(¹ 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090; ² 浙江大学农业生态研究所, 杭州 310029)

【摘要】 水体富营养化治理已成为当今世界性难题. 解决水体富营养化问题的关键是调控水生生态系统结构, 使其恢复自然、健康和稳定的水生生态系统功能, 提高水生生态系统的生物净化能力. 水生高等植物及水生植被是水生生态系统中最重要初级生产者, 它们个体大、生长周期长、吸取和储存营养物质的能力强, 保持和恢复一定数量的水生植物种群可抑制浮游植物的生长, 提高系统的生物多样性, 使水生生态系统结构更加稳定. 水生动物在水生生态系统物质和能量循环中处于十分重要的地位. 浮游动物和底栖动物可直接捕食浮游植物, 控制浮游植物的数量; 而改变鱼类种群结构可提高浮游动物的生物量, 从而间接控制浮游植物的大量繁殖, 达到治理水体富营养化的目的. 我国的生物净化研究还处于起步阶段, 今后在水生高等植物及水生植被生物净化的关键技术及优化水产养殖新模式技术研究方面有待提高, 这将对我国水体富营养化治理及水体可持续利用有着重要的意义.

关键词 水体 富营养化 生物净化

文章编号 1001-9332(2003)11-2057-05 **中图分类号** Q147 **文献标识码** A

Advances in research of biological purification of eutrophic water body. QUAN Weimin¹, SHEN Xinqiang¹, YAN Lijiao² (¹ East China Sea Fisheries Institute, Chinese Academy of Fisheries Science, Shanghai 200090, China; ² Agroecology Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2003, 14(11):2057~2061.

Eutrophication is a global problem, and the key of its controlling is to manipulate the structure of aquatic ecosystem, to recover the function of natural, healthy and stable aquatic ecosystem, and to improve the biological purification capability of eutrophic water body. Aquatic higher plant and vegetation is the most important primary producer in aquatic ecosystem, because of its large individual, long life cycle, and strong capability of absorbing nutrients. Maintaining and restoring a certain amount of aquatic plant could restrain the growth of phytoplankton, improve the biodiversity of aquatic ecosystem, and stabilize its structure. Aquatic animal plays an important role in material and energy cycles of aquatic ecosystem. Zooplankton and benthos can graze phytoplankton directly, so as to control the number of phytoplankton. It is possible to improve the number of zooplankton by changing the structure of fish population, which might control the serious reproduction of phytoplankton, and achieve the goal of controlling eutrophication. The research of biological purification is still at its initial stage in China. In future, the following two aspects of researches should be enforced: the key technology of biological purification of aquatic higher plant and vegetation; the new model of breed aquatics. These technologies will have a important significance to controlling eutrophication and in sustainable utilization of water body.

Key words Water body, Eutrophication, Biological purification.

1 引言

水体富营养化治理已成为当今世界性难题. 20 世纪 60 年代以来各国先后对其进行了大量研究, 并提出了相应的对策、措施, 归纳起来主要包括: (1) 改善大环境减少输入水体的外源性污染物; (2) 转移污水排放和稀释扩散; (3) 调控较清洁水冲洗; (4) 挖泥等水利工程措施; (5) 化学措施; (6) 生物措施; (7) 局部人工生态系统工程等^[5, 15, 33]. 水体富营养化防治以前乃至目前仍以“Vollenweider 方法”, 即单纯从控制外源污染、减少外源养分负荷为主. 20 世纪 80 年代以来, 人们在治理水体富营养化时发现, 当显著减少外源养分负荷以后, 水质并未得到明显改善, 水体中 N、P 浓度特别是 P 浓度并未降低, 原因在于沉积物已成为水体 N、P 的重要来源, 即所谓“内源负荷”^[3, 25]. 生态恢复成为水环境治理的最佳

途径. 在有效地控制外源污染的同时, 通过调控水生生态系统结构, 恢复自然、健康和稳定的水生生态系统功能, 增强对外界干扰的缓冲能力, 使水生生态系统处于良性和可持续循环当中^[3]. 因此, 系统内部调控尤其是提高水体自身的生物净化作用才是解决水体富营养化的长久之计.

2 生物净化作用的国内外研究概况

自然水体有净化(自净)作用. 在太阳能的作用下, 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

* 国家“九五”科技攻关资助项目(96-015-01-010)和杭州市环保局资助项目(9901 号).

** 通讯联系人.

2001-09-11 收稿, 2002-12-23 接受.

净化^[27]。藻类和水生高等植物的生物过程能够利用太阳能将水溶解物质富集浓缩,转化为生物量,消耗大量太阳能,提高能质^[7]。健康的水生生态系统是一个包括许多子系统的复杂系统,每一个子系统都担负一定的功能,为了提高整个系统的净化能力,必须借助生态工程的手段恢复水生生态系统中重要生物组分,从而建立自然、健康、稳定的水生生态系统。

2.1 水生高等植物及水生植被净化作用研究

水生高等植物是水生生态系统保持良性运行的关键类群,也是整个水生生态群落多样性的基础。水生高等植物可划分为沉水植物、漂浮植物、浮叶植物和挺水植物等类型^[10,15]。不同类型水生植物有着不同的净化功能。挺水植物通过阻止水流和减小风浪使悬移质沉降,它主要吸取深部底泥中的营养盐,很少直接吸收水中的营养盐,所以挺水植物有把下层底泥中的营养盐转移到表层的作用,不利于直接净化水质;浮叶植物容易种植和收获,有一定的经济和观赏价值,在一定的季节可以作为重要的支撑系统,在一般浅水水体中有良好的净化功能;大型漂浮植物在光照和营养盐竞争上比浮游植物有优势,耐污性很强,已经发展了在大风浪条件下的种植技术,是净化水质的良好选择^[27,31,33]。据资料记载,世界上研究得较多的水生高等植物有水葫芦(*Eichhornia crassipes*)、水花生(*Alternanthera philoxeroides*)、浮萍(*Lemna minor*)、紫萍(*Spirodela polyrrhiza*)、水鳖(*Gyrodarhis dubia*)、荇菜(*Nymphaoides peltatum*)、满江红(*Azolla imbricata*)等^[2,7,17,21,31,33,34]。目前已证实具污水净化效应的水生高等植物很多,但大多数研究是在室内或人工构建的污水净化塘中进行的,而直接在天然湖泊中放养水生高等植物的研究还不多见。国外学者早先就认识到水生高等植物在湖泊中具有重要的调控作用,并对其生物净化的机理和可行性进行了探讨^[1,2,10,24]。我国近年也开展了这方面的研究,有关学者分别在太湖、滇池等湖泊开展了研究,如吴玉树^[34]等在滇池北端的草海边利用天然湖湾、湖塘分别放养水葫芦、莲、满江红、荇菜、茭白等5种植物,以试验的5种植物相比,对水中N、P及重金属的富集系数和净化率均以水葫芦为最高。王国祥^[33]等在太湖五里湖中桥湖湾研究压入水面下的冬季喜旱莲子草,试验也取得了成功。据对我国几个主要大型湖泊水生高等植物分布状况与湖泊营养状态的对比分析(表1),可以看出,水生高等植物分布广泛(超过湖泊总面积50%),生物量较高的湖泊,浮游植物生物量就较低(叶绿素低于 $10\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$),透明度就高。有学者^[39]对武汉东湖中水草生长较多的汤林湖区中沉水植物的生物量和透明度关系进行多年比较,可以得出在水草生物量高的年份,透明度也高,反之则低,这也证明水生高等植物在湖泊环境中具有巨大的环境效应。

近10年来,随着水体富营养化加剧和其它人类活动影响,一些湖泊,尤其是我国长江中下游地区浅水湖泊中,沉水植被被锐减甚至消失。如武汉东湖,20世纪60年代十分繁茂的沉水植被现已濒临灭绝。沉水植被作为主要初级生产者,

在水生生态系统平衡中起着重要的作用。在退化湖泊生态系统重建与恢复中,重建水生植被是关键性的步骤^[6,14]。表2列出了沉水植被在湖泊水生生态系统中的缓冲机制及其破坏因子^[6,29,30,35,36]。

表1 中国若干湖泊中水生高等植物与浮游植物、透明度以及N、P负荷和浓度之间的关系

Table 1 Relationship between aquatic macrophyte and phytoplankton, TN, TP concentration in some Chinese lakes

湖泊 Lakes	平均生物量 Average biomass ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	面积 Area	叶绿素 a Chla	营养类型 Trophic state	全 N Total N ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	全 P Total P ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
洱海 Erhai	5.7	60	1.23	贫 Poor	0.32	0.02
固城湖 Gucheng hu	6.4	95	3.30	中 Middle	0.68	0.02
保安湖 Baoan hu	3.3	80	2.18	中 Middle	1.70	0.06
南四湖 Nansi	2.3	83	3.83	中 Middle	3.38	0.21
淀山湖 Dianshanhu	3.9	56	5.98	中 Middle	1.34	0.09
巢湖 Chaohu	0.03	1.6	15.02	富 Rich	2.31	0.20
滇池 Dianchi	4.2	1.3	23.8	富 Rich	1.18	0.10
甘棠湖 Gantanghu	极少 Less	-	37.6	富 Rich	2.50	0.09
西湖 Xihu	极少 Less	-	60.43	富 Rich	1.73	0.24
玄武湖 Xuanwuhu	极少 Less	-	96.0	富 Rich	3.87	0.31
墨水湖 Moshuihu	极少 Less	-	153.0	富 Rich	20.82	1.03

总的来说,水生高等植物的净化机制有如下内容:水生高等植物通过促进湖水含磷物质的沉降和抑制表层沉积物的再悬浮而起到促进磷沉积,从而降低了水体磷含量,水生植物将湖水中的氮传输到底泥中,促其进入地球化学循环的功能,这对于降低湖水中的氮含量,防止湖泊富营养化有积极意义。水生高等植物还和浮游植物竞争营养物质和光能,前者个体大、生长周期长、吸取和储存营养物质的能力强,它的存在可抑制浮游植物的生长,水生高等植物的恢复增加了系统的生物多样性,提高了系统对外界干扰的缓冲能力,使水生生态系统结构更加稳定。所以,水生高等植物不仅是湖泊重要初级生产者,而且对水生态系统的结构和功能具有决定性的影响,提高水生生态系统净化能力^[17,21,24,26,37]。

最能解释水生高等植物及水生植被生物净化机理的是国内学者李文朝^[16,18]提出的湖泊生态系统三维多态概要模型。这个模型是由两个曲面组成的三维模型,第一维是外源养分负荷(External Nutrient Level, ENL),水体养分水平(Water Nutrient Level, WNL)为第二维,第三维描述高等植物和浮游植物的相对优势(Relative Denominate, RD),上层曲面代表水生高等植物占优势的清水阶段,下层曲面则是浮游植物占优势的浊水阶段。这两个阶段是根据WNL维上a和b的值被划分为6个状态(M1、M2、M3、P1、P2、P3)。在同一营养水平下,可能存在两种状态,即浮游植物占优势的浊水状态和水生高等植物占优势的清水状态,即湖泊富营养化的多态现象^[5,8]。

2.2 水生动物净化作用研究

为了确定放养结构和调整生物群落,20世纪60~70年代通常是从外源营养物输入及初级生产力入手,探讨水质变化及初级生产水平对生物群落的影响,即所谓的上行途径(Bottom up approach)。20世纪80~90年代,人们采用了另一种途径:探讨食物链上层生物的变化对下层生物、初级生产力及水质的影响,即下行效应(Top down effect),即利用水

表2 沉水植被对水环境的缓冲机制及其植被破坏因子

Table 2 Buffering mechanism of submerged vegetation on the water and its destroying factors

沉水植被缓冲机制 Buffering mechanism of submerged vegetation	沉水植被破坏因子 Destroying factors of submerged vegetation
减少由于风场引起湖泊沉积物的再悬浮 Reduce susceptibility of to wind-induced resuspension	春季水位提升 Increase water level during spring
与浮游植物竞争 N 和 P Compete with phytoplankton for N and P	化学毒物对植被的毒害作用 Chemicals toxic to vegetation
提高反硝化引起的 N 损失 Promotes N loss by denitrification	鸟类捕食水生高等植物 Macrophyte grazing by birds
排泄对浮游植物有化感作用的物质 Excretes substances allelopathic to phytoplankton	底栖动物大量繁殖 Benthivore stocking
提高浮游动物生物量及捕食量 Promotes grazing of phytoplankton by provide refuge to Daphnia	化学毒物对浮游动物的毒害作用 Chemicals toxic to Daphnia
下行控制浮游植物捕食 Promotes phytoplankton grazing by providing refuge to pike and subsequent top-down control of planktivores	暴雨 Storm events
减少鱼引起的再悬浮 Reduces fish-induced resuspension by hindering bottom feeding	

生动物来净化富营养化水体^[19,22]。

早在 20 世纪 70 年代时,世界上就有不少湖泊和河流引进草鱼来清除过多的水草,以防止其二次污染。自 1985 年以来,荷兰在对 Worldwijd 等诸多浅型湖泊实施治理中,在利用工程措施削减了 50% 以上 P 负荷量的情况下,发现湖内仍难以自动实现生态恢复。通过对湖内鱼类群体数量和种类组成的调控,成功地实现了由浊水状态向草型状态的转变^[12]。芬兰的 Vesijarvi 湖自 1976 年就削减了 90% 以上 P 负荷量,但 10 年之后蓝藻水华仍有增无减。随即对以大型浮游动物为食的河鲈鱼群进行了高强度的捕捞,保护了大型浮游动物,通过它们摄食藻类,收到了明显效果^[18]。鲢和鳙终生以浮游生物为食,由于食物链短,能够有效地利用水体中的营养物质^[4]。食鱼性鱼类对生态系统的影响已成为 20 世纪 80 年代末以来的研究热点^[8,9,13]。Drenner 等^[9]把鱼类调控分为 5 种类型,即放养食鱼性鱼类、放养食鱼性的鱼类 + 捕获部分鱼类、捕获部分鱼类、减少鱼类数量和鱼类数量减少然后重新放养。根据水质改善状况如透明度增加和叶绿素含量下降等来评价 5 个调控措施的成功比率(表 3)。总的来说,61% 的调控措施在提高水质方面是成功的。放养食鱼性鱼类可导致食浮游动物的鱼类数量下降,摄食藻类的浮游动物数量上升,从而达到控制浮游藻类,改善水质的目的。

另外,底栖软体动物也对富营养化水体具有明显的净化效应。有关研究发现,在中-富营养型湖泊内,软体动物在生物量上占主要地位;而在重富营养型湖泊内则无软体动物,底栖动物的生物量均以寡毛类或摇蚊幼虫组成。通过增加螺蛳、河蚌放养量,补充底栖动物资源数量,增加了系统稳定性,促进了物质循环,达到了净化水质的目的^[21]。

浮游动物在水生生态系统中起着重要的调控作用,其调控作用主要体现在以下几个方面:(1)对初级生产力的控制;(2)对营养级间生态转换效率的调控;(3)对高层捕食者的控制作用;(4)对水层-底栖耦合关系的控制作用。初级生产者(浮游植物)的生命周期短、繁殖快,初级产品如不迅速被次级生产者(浮游动物)利用将形成积累,产生所谓的水华,严重将形成赤潮;而浮游动物能捕食初级生产者,对浮游植物具有重要的控制作用。在海洋中,浮游动物摄食率表现为:大型浮游动物 > 中型浮游动物 > 小型浮游动物;就摄食量而言,小型浮游动物占主导地位,占整个浮游动物总摄食量的 50% 以上,它们主要捕食小型和微型浮游植物。许多研究结果表明,浮游动物群体的摄食压力通常小于浮游植物现存量

的 5%,小于初级生产力的 10%,但另外有些调查结果显示某些海区浮游动物群体的摄食量占浮游植物现存量的较大一部分,其摄食压力接近甚至超过浮游植物的初级生产力^[22,28]。

表3 5 种鱼类生物调控措施对水质改善成功的百分率

Table 3 Effectiveness of fishes as biomanipulation to restore lake water quality

鱼类的生物调控措施 Biological regulation of fishes	成功的百分率 Percentage of success(%)
放养食鱼性鱼类 Piscovre stocking	28.6
放养食鱼性鱼类 + 捕获部分鱼类 Piscovre stocking + Partial fish removal	60.0
捕获部分鱼类 Partial fish removal	90.0
减少鱼类数量 Elimination of fish	40.0
鱼类数量减少然后重新放养 Elimination of fish followed by restocking	66.7

日本学者在研究湖泊生态模型时,提出了水生动物调控作用的机理模型,该模型较好地解释了水生动物生物净化作用的机理。他们认为生物净化最基本的原理是通过改变鱼类的群落结构,如提高食鱼性鱼类生物量,降低以浮游动物为食的滤食性鱼类生物量,进而引起浮游动物生物量上升,浮游动物通过摄食浮游植物、细菌和悬浮有机碎屑,达到改善水质的作用^[22,23]。

另外,有关研究发现氮循环细菌在水体自净中具有不可忽视的作用。利用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,水体悬浮物为三级载体,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提高细菌浓度,能够增强系统净化能力^[20,32]。

3 我国生物净化研究的展望

生物净化是随着环境治理中越来越重视生态系统和生态恢复方法而逐渐形成的新兴研究领域。目前的研究仍局限于室内模拟或水体的局部区域,实际运用只注重运用某一项生物净化措施,而没有将多种生物净化技术加以组合形成比较系统的生物净化技术。我国应着眼于以生物净化为基本原则的我国水体可持续综合利用模式的研究,这将会极大地促进我国的国民经济发展。

3.1 加强水生植物生物净化的新技术研究

目前生物净化研究中常见的水生高等植物都具有较强的耐污和强吸附能力,能有效地吸收水体中的 N、P 和重金

属成分,即我们通常称之为的“环保型”水生高等植物。人们在利用水生高等植物对湖泊进行生物净化时,通常只根据环保性能来选择水生高等植物,而没考虑它们的经济效益、资源化利用程度以及该植物在水体中的布局对整个水生生态系统群落结构的影响。今后,要选择一些具有较高环保性、经济上可行、同时可资源化利用的水生高等植物。另外,国内外研究发现,利用多种水生高等植物和水生植被构建人工复合生态系统在治理水体富营养化时具有独特优势,它可克服单一水生植物季节性变化明显,生物净化作用不稳定的缺点,发挥多种水生高等植物在时间和空间上的差异,实现优势互补,从而可稳定地净化湖泊水生生态系统^[11,27],但这一技术应用范围极其有限,目前只处于围隔试验阶段,因此有必要就其大规模应用所必须配套的合理放养技术、物理工程技术、种群优化组合技术和资源化回收及加工技术进行深入研究^[24]。

3.2 优化水产养殖技术

浮游动物处于整个水生生态系统的中心地位,无疑它的数量和组成是决定生物净化能够成功的关键。但由于浮游动物个体小、种类繁多,直接调控其群落数量既不可能又不现实,只有通过鱼类对浮游动物群体进行间接调控。20 世纪 70 年代,人们就纷纷引入草鱼来消灭湖泊中的杂草,防止草型富营养化,这一措施有效地阻碍了湖泊草型富营养化的发展,但也使湖泊从一个极端走向了另一极端,湖泊发展为藻型富营养化^[29]。80 年代,人们转而向湖泊引入鲢、鳙等滤食性鱼类来控制浮游植物生物量,主要优点是能量转化率高、成本低、加速养分循环和减少了养分沉积量。有实验证实,当放养鲢鳙后,能显著降低湖水中正磷酸盐浓度,鱼类捕食改变了系统的群落结构和代谢强度。但水面利用率低、效益低、食物链短,特别是当鲢鳙大量放养时,易破坏湖泊的生态平衡^[4,19]。因此,急需探索既具有较高渔业效益又具有环境效益的鱼类新品种和优质高效渔业模式。我国的鱼类生物净化研究还处于起步阶段^[19,38,40],仅探索了滤食性鱼类能抑制水华的鲢鳙生物量为 $40 \sim 50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,但在食鱼性鱼类的净化作用还处于实验研究阶段,由于我国湖泊鱼类为温水性鱼类,鱼类群落结构复杂,可见我国湖泊的食物链串联效应会与北美和北欧不一样,因此我们有必要从生态位和食物链的角度,选择对生态系统不会造成大破坏的新型优质湖泊放养种类,对其生理生态特性进行研究,并通过实验湖沼学,预测其对饲料的捕食压力,探讨其对水生生态系统的影响,建立我国水体生物净化的基本技术^[23]。

参考文献

- Aoyama I, Nishizaki H, Yagi M. 1990. Uptake of nitrogen and phosphorus, and purification capacity by water hyacinth (*Eichornia crassipes*). *Water Resour Res*, 26(11):2643~2652
- Brahma TT. 1991. Nitrogen and phosphorus removal capacity of four chosen aquatic macrophyte in tropical freshwater ponds. *Environ Conser*, 18(2):143~148
- Chapin FS, Brain HW, Richard JH. 1997. Biotic control over the function of ecosystems. *Science*, 277:500~504
- Chen S-L(陈少莲), Liu X-F(刘肖芳). 1991. The role of silver carp and bighead in the cycling of nitrogen and phosphorus in the east lake ecosystem. *Acta Hydrobiol Sin* (水生生物学报), 15(1):8~21(in Chinese)
- Chen S-Y(陈水勇), Wu Z-M(吴振明), Yu W-B(俞伟波), et al. 1999. Formation, harmfulness, prevention, control and treatment of waters eutrophication. *Environ Sci Technol* (环境科学与技术), 2:11~15(in Chinese)
- Dai M, Ni LY, Xie P. 1999. Experimental studies on the effect of submerged macrophytes on the eutrophication of lake water using large sized enclosures. *Acta Hydrobiol Sin*, 23(2):97~101
- David MH. 1986. The effects of artificial enrichment upon the planktonic and benthic communities in a mesotrophic to hypertrophic loch series in lowland scotland. *Hydrobiologia*, 137:9~20
- Dennis M, Kenneth AR. 2000. An individual-based model of lake fish communities: application to piscivore stocking in lake Mendota. *Ecol Model*, 125(1):67~102
- Drenner RW, Hambright KD. 1999. Biomanipulation of fish assemblages as a lake restoration technique. *Archiv Fuer Hydrobiol*, 146(2):129~165
- Gulati RD. 1990. Can macrophytes be useful in biomanipulation of lakes? The lake Zwenmlust example. *Hydrobiologia*, 200/201:399~407
- Haycock NE and Burt T. 1992. Floodplain as nitrate buffer zones. *NERC-News*, 21:28~29
- Hosper HS. 1998. Stable states, buffers and switches; an ecosystem approach to the restoration and management of shallow lakes in the Netherlands. *Water Sci Technol*, 37(3):151~164
- Isabelle D, Jean D. 1999. A new approach in biomanipulation techniques: use of a phytoplanktivorous fish, the silver carp. *Ann Biol*, 38(1):91~106
- Jin G(金 刚), Li Z-J(李钊杰), Liu H-Q(刘伙泉), et al. 1999. Recovery of submerged vegetation and its fishery benefit in Bao'an Lake. *Lake Sci* (湖泊科学), 11(3):261~265(in Chinese)
- Jin X-C(金相灿), Liu S-K(刘树坤), Zhang Z-S(章宗涉), et al. 1995. China Lake Environment. Beijing: China Ocean Press. (in Chinese)
- Li WC. 1998. Conceptual model for predicting and managing vegetative types in shallow lakes. *Ecol Eng*, 10:165~178
- Li W-C(李文朝). 1994. Ecological recovery of shallow eutrophical lakes—a case study of reestablishment of aquatic macrophyte in Wuli lake. *Lake Sci* (湖泊科学), 6(3):245~256(in Chinese)
- Li W-C(李文朝). 1995. Biological regulation in the treatment of shallow eutrophic lakes. In: Chen X-F(陈晓峰), Dai X-F(戴小峰), Hu T(胡 涛). eds. Ecological Environment Research and Sustainable Development. Beijing: China Environment Science Press. (in Chinese)
- Li X-F(李辛夫), Chen Y-Y(陈宜瑜). 1998. The study of inland waterbody biology and the sustainable development of freshwater fisheries. *Acta Hydrobiol Sin* (水生生物学报), 22(2):174~180(in Chinese)
- Li Z-K(李正魁), Pu P-M(濮培民). 2000. Purification of lake water by simulative dynamic experiment using immobilized nitrogen cycle bacteria in water. *Lake Sci* (湖泊科学), 12(4):193~203(in Chinese)
- Liu B-Y(刘保元), Qiu D-R(邱东茹), Wu Z-B(吴振斌). 1997. Effects of reestablishment of aquatic macrophytes on zoobenthos in a eutrophic shallow lake. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 3(4):323~327(in Chinese)
- Masaki S, Akiyoshi S, Motoyuki S. 2000. A predictive of long-term stability after biomanipulation of shallow lakes. *Water Res*, 34(16):4014~4028
- Masaki S, Akiyoshi S, Motoyuki S. 2001. A mathematical model of a shallow and eutrophic lake(the Keszthely basin, lake balaton) simulation of restorative manipulations. *Water Res*, 35(7):1675~1686
- Moss B. 1990. Engineering and biological approach to the restoration from eutrophication of shallow lakes in which aquatic plant communities are important components. *Hydrobiologia*, 200/201:367~377

- 25 Nerbug GK. 1991. Phosphorus from internal source in the Laurentian Great lakes, and the concept of threshold external load. *Great Lakes Res*, 17:132~140
- 26 Pu P-M(濮培民), Hu W-P(胡维平), Wang G-X(王国祥), et al. 1998. Control and treatment of Taihu lake waters environment. In: Cai Q-M(蔡启铭) ed. Eco-studies of Taihu Lake Environment. Beijing: Meteorology Press. (in Chinese)
- 27 Pu P-M(濮培民), Wang G-X(王国祥), Li Z-K(李正魁), et al. 2001. Degradation of healthy aqua-ecosystem and its remediation theory, technology and application. *Lake Sci* (湖泊科学), 13(3): 193~203(in Chinese)
- 28 Su J-L(苏纪兰), Tong Q-S(唐启升). 2002. Study on Ecosystem Dynamics in Coastal ocean II Process of the Bohai Sea Ecosystem Dynamics. Beijing: Science Press. 142~158(in Chinese)
- 29 Wanderson RD. 1980. Effectiveness of vegetated buffer strips in controlling pollution from freelot runoff. *Environ Qual*, 9:483~487
- 30 Wang C-H(王朝晖). 1999. Studies on the ability of hydrodictyon reticulatum to remove nitrogen and phosphorus under differential environment. *China Environ Sci* (中国环境科学), 19(3):257~261 (in Chinese)
- 31 Wang G-X(王国祥). 1998. The purification of artifical complex ecosystem for local water in Taihu lake. *China Environ Sci* (中国环境科学), 18(5):410~414(in Chinese)
- 32 Wang G-X(王国祥), Pu P-M(濮培民), Huang Y-K(黄宜凯), et al. 1999. Distribution of nitrogen cycle bacteria in an artificial ecosystem of Taihu lake. *Lake Sci* (湖泊科学), 11(2):160~164(in Chinese)
- 33 Wang G-X(王国祥), Pu P-M(濮培民). 1999. Influence of some artificial controls on eutrophic algae population dynamics. *Environ Sci* (环境科学), 20(2):71~74(in Chinese)
- 34 Wu Y-S(吴玉树), Li S-L(李森林). 1988. The purification efficiency of aquatic vascular plants to the polluted water in Dianchi Lake. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 8(4):346~352(in Chinese)
- 35 Wu Y-S(吴玉树), Yu G-Y(余国营). 1991. Purification of Dianchi Lake by radical submerged hydrophyte. *Acta Sci Circums* (环境科学学报), 11(4):411~416(in Chinese)
- 36 Yates P, Sheridan JM. 1983. Estimating the effectiveness of vegetated flood plains, wetlands as nitrate-nitrite and orthophosphorus filters. *Agric Ecosyst Environ*, 9:303~314
- 37 Yuan J-F(袁峻峰), Zhang Z-S(章宗涉). 1993. Biochemical interference of aquatic macrophyte ceratophyllum demrsum on algae. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 13(1):45~50(in Chinese)
- 38 Yuan J-R(阮景荣), Rong K-W(戎克文), Wang S-M(王少梅). 1995. Study on top-down effect of silver carp and bighead in micro-ecosystem. *Lake Sci* (湖泊科学), 7(3): 226~234(in Chinese)
- 39 Zhang Z-S(章宗涉). 1998. Macrophyte-phytoplanton relationship and lake trophic state. *Lake Sci* (湖泊科学), 10(4):83~86(in Chinese)
- 40 Zhou J(周洁), Lin F(林峰). 1990. The feeding habit of silver carp and bighead and their digestion of algae. *Acta Hydrobiol Sin* (水生生物学报), 14(2):170~172(in Chinese)

作者简介 全为民,男,1977年生,硕士,助理研究员,主要从事水体富营养化和环境生态模拟与评价等方面的工作,发表论文多篇. E-mail:quanweim@163.com