

大莲湖生态修复工程对浮游植物群落结构的影响

朱浩^{1,2} 张拥军¹ 裴恩乐³ 刘兴国^{1*} 夏述忠³

(1. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092;

2. 农业部渔业装备与工程重点开放实验室, 上海 200092;

3. 上海市野生动植物保护管理站, 上海 200023)

摘要 为构建稳定的大莲湖生态系统, 对大莲湖生态修复区内采取了地型塑造、水系沟通、植被恢复和人工增殖放流等措施, 分析了生态修复区浮游植物, 营养盐的变化状况和放流鱼类生长情况。结果显示, 生态修复实施后, 水体中藻细胞密度较人工养殖池塘明显下降, 藻类结构发生明显变化, 蓝藻所占比重逐渐减小, 水体中的氮、磷和叶绿素明显下降; 放流鱼种生长和成活情况较好。因此, 采用生物操纵技术措施可实现湖泊的生态恢复。

关键词 大莲湖 生态修复 浮游植物

中图分类号 X171.1 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2011)10-2391-05

Effects of ecological restoration project on phytoplankton community in Dalian Lake

Zhu Hao^{1,2} Zhang Yongjun¹ Pei Enle³ Liu Xingguo¹ Xia Shuzhong³

(1. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Fishery Equipment and Engineering, Ministry of Agriculture, Shanghai 200092, China;

3. Shanghai Wildlife Conservation & Management Center, Shanghai 200023, China)

Abstract Several measures including shaping the physiognomy, dredging the water system, vegetation restoration and artificial reproduction of fish were carried out to construct a stable ecosystem of Dalian Lake. Changes of phytoplankton population, nutrient salt concentration and fish growth were analyzed. The results showed that algae density of Dalian Lake was significantly lower than that in artificial pond. The plankton population changed greatly with the reduced proportion of *cyanobacteria* observed. The concentrations of nitrogen, phosphorus and chlorophyll decreased significantly compared to the former conditions. In addition, survival and growth of fish released were quite satisfied. The success of this ecosystem restoration project was certified by the above observations. Thus, biomanipulation could be effective in lake ecosystem restoration.

Key words Dalian Lake; ecological restoration; phytoplankton

湖泊湿地生态系统与人类的生存发展密切相关, 随着全球气候变暖、人口增加、水资源短缺和水污染日益严重, 湖泊湿地生态系统的保护与修复工作已成为人类可持续发展的最重要工作之一。我国对湖泊富营养化的现状, 产生的原因及生态修复措施已进行了一系列的研究, 并取得了一定的成果, 如“滇池沿岸带生态修复技术研究及工程示范”系列^[1], “太湖五里湖生态重建示范工程”系列等^[2], 回顾湖泊富营养化的研究成果, 单一的措施难以有效恢复健全稳定的生态系统, 因此, 本文以淀山湖水系中富营养化较为严重的大莲湖作为研究对象, 在地型塑造, 水系沟通的基础上, 采用恢复植被, 人工增殖放流等生物操纵方式修复生态系统, 并对生态区水质情况进行了监测。

浮游植物作为水生态系统的初级生产者对水环境的变化较敏感, 是评价水环境质量的重要指标^[3-5], 2009年作者对大莲湖示范区的浮游植物群落变化及其相关的理化因素进行了监测, 以期评价生态修复的效果, 为其他湖泊湿地的治理积累资料。

基金项目: 上海市科学技术委员会资助 (08DZ1203201, 08DZ1203203); 上海市农委资助 (沪农科攻字 (2009) 第9-4号)

收稿日期: 2010-12-20; **修订日期:** 2011-04-02

作者简介: 朱浩 (1985~), 男, 研究实习员, 主要研究方向为池塘生态工程。E-mail: zhuha0511@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: liuxg1223@163.com

1 材料与方法

1.1 研究概况

大莲湖属淀山湖水系,总面积 14.6 km²,核心区面积 4.6 km²。其自然条件与淀山湖基本一致。2007 年 5 月太湖蓝藻暴发事件引起党中央、国务院的高度重视。在中央和地方各级政府的组织下,江苏、浙江、上海二省一市编制了《太湖流域水环境综合治理总体方案》。在此基础上,上海市政府制定了《上海市太湖流域水环境综合治理专题调研报告暨实施方案》,该实施方案中,上海西郊淀山湖湿地恢复区建设被列为湿地修复、水质净化的重点工程。作为上海市太湖流域水环境综合治理重点工程之一,按照上海市科委要求,有关部门组织人员对大莲湖进行了地形塑造和水系灌通等一系列的生态修复工程^[6]。

1.2 主要修复措施

2008 年 12 月—2009 年 5 月,对大莲湖进行了地型塑造和水系灌通等一系列的生态修复工程^[6],将各鱼塘间的塘埂全部挖开,鱼塘打通形成一个完整的、湖底高低起伏的积水湖泊,新构建的湖体平均水位 1.3 m,平均高水位 1.6 m,平均低水位 1 m。为

了整个水系的流通性和循环性,在示范区的林地和一期工程区周边挖掘水道沟通大莲湖和各条河流,最终与拦路港水系连成一片,形成连贯的大水系。

地型塑造和水系灌通后,对生态修复区进行了植被恢复,植物选择主要依据有利于发挥湿地净化功能、生物多样性、因地制宜和乡土性原则,同时兼顾景观设计和季相变化。根据植物带配置数量的不同,由岛屿向水面方向根据坡降比的差异分别配置森林湿地带、灌丛湿地带、挺水植物带和沉水植物带(表 1)。

根据湖面水生植物的生长情况,2009 年 3 月下旬对大莲湖生态修复区的水花生进行了一次全面人工清理,2009 年 5 月下旬对大莲湖生态修复区的沉水植物进行了部分清理。

在大莲湖水域适宜增殖品种有青鱼、草鱼、鲢鱼、鳙鱼、鲤鱼、鲫鱼和鳊鱼等大宗淡水鱼类,黄颡鱼、乌鳢、黄鳍鲷、鲮鱼、子陵吻鰕虎鱼、红鳍鲷、麦穗鱼、棒花、鲇亚科种类和鳊鲂亚科鱼类等底层杂食性鱼类。

根据鱼类生长特点,分别于 2009 年 11 月 27 日,2010 年 3 月 16 日,2010 年 5 月 12 日 3 次对大莲湖进行人工渔业资源增殖放流。放养鱼种种类及类别见表 2~表 4。

表 1 生态修复区植物
Table 1 Plants used in the ecological restoration

区 域	品 种
森林湿地带	枫杨(<i>Pterocarya stenoptera</i>), 水杉(<i>Metasequoia glyptostrodoides</i>), 池杉(<i>Taxodiumascendens. Brongn</i>), 乌桕(<i>Sapium rotundifolium Hemsl</i>)
灌丛湿地带	蔷薇(<i>Rosa multiflora</i>), 金钟花(<i>Forsythia viridissima</i>), 三棱草(<i>Cyperus rotundus</i>)
挺水植被带	芦苇(<i>Phragmites australis</i>), 野茭白(<i>Zizania aquatica</i>)
沉水植被带	轮叶黑藻(<i>Hydrilla verticillata</i>)
扎根浮叶植物带	芡实(<i>Semen Euryales</i>), 藕(<i>Nymphaeaceae</i>)

表 2 2009 年 11 月 27 日人工增殖鱼种类及数量
Table 2 Types and quantities of fish released on Nov. 27,2009

种 类	鲫鱼 (<i>Carassius auratus</i>)	鳊鱼 (<i>Parabramis pekinensis</i>)	白鲢 (<i>Hypophthalmi chthysmolitrix</i>)	花鲢 (<i>Aristicht-hys nobilis</i>)	翘嘴红鲌 (<i>Erythroculter ilishaeformis</i>)	乌鱼 (<i>Channa argus</i>)	草鱼(<i>Ctenoph aryngodon idellus</i>)	青鱼 (<i>piceus</i>)	其他 鱼种
规格(g)	100	400	150	100	250	400	500	650	150
数量(kg)	100	10	5	1	1	1	10	1	31

表 3 2010 年 3 月 16 日人工增殖鱼种类及数量
Table 3 Types and quantities of fish released on Mar. 16,2010

种 类	白鲢 (<i>Hypophthalmichthysmolitrix</i>)	花鲢 (<i>Aristichthys nobilis</i>)	鲫鱼 (<i>Carassius auratus</i>)	草鱼 (<i>Ctenopharyngodon idellus</i>)	其他 鱼种
规格(g)	60	65	100	80	100
数量(kg)	300	50	10	10	130

表 4 2010 年 5 月 12 日人工增殖鱼种类及数量
Table 4 Types and quantities of fish released on May 12,2010

种 类	白鲢 (<i>Hypophthalmi chthysmolitrix</i>)	花鲢 (<i>Aristichthys nobilis</i>)	鳊鱼 (<i>Parabramis pekinensis</i>)	鲫鱼 (<i>Carassius auratus</i>)	草鱼 (<i>Ctenophary ngodon idellus</i>)	青鱼 (<i>piceus</i>)	翘嘴红鲌 (<i>Erythroculter ilishaeformis</i>)	其他 鱼种
规格(g)	450	400	500	500	700	200	350	100
数量(kg)	300	100	50	100	100	10	10	80

1.3 采样与监测方法

实验在大莲湖生态修复区的进水口,河道,湖区设采样点,另设一人工养殖鱼塘为对照点(大莲湖生态修复区原为人工鱼塘)。选择下列指标:水温、pH、溶氧、盐度、浮游植物密度、叶绿素、总氮和总磷。于 2009 年 10 月—2010 年 8 月每月作一次现场调查并同步进行浮游植物和水化学取样,在实验室分别进行定性,定量测定^[7,8],运用 SPSS13.0,结合 Excel 对测定数据进行统计分析绘图。

对大莲湖生态修复区撒网捕鱼,称鱼体的均重,并根据同一期鱼苗在人工养殖鱼塘中的生长粗略估算放流鱼类的生长情况。

2 结果与分析

2.1 放流效果及评价

2010 年 9 月对大莲湖生态修复区进行了放养鱼种打样,花鲢和白鲢的生长情况较好,并且在有水草的地方较易起捕。青鱼、乌鱼和翘嘴红鲌等鱼种,由于放养时密度较小,从而撒网采样时未能得到确切数据,但从当地管理人员那里得知,放流结束后,湖面未出现死鱼现象;因此,推算 3 次人工增殖措施较为成功。

2.2 放流对水体中藻类的影响

2.2.1 藻类群落结构特点

2009 年 10 月—2010 年 8 月,大莲湖生态修复区共鉴定出藻类 8 门, 45 属,79 种,其中绿藻占多数,39 种,硅藻 12 种,蓝藻 11 种,甲藻 3 种,隐藻 5 种,裸藻 4 种,黄藻 3 种,及其他 2 种。

从藻细胞密度上来看(图 1),对照组人工养殖鱼塘藻细胞年密度平均达到 12.61×10^3 个/mL,进水口藻细胞密度为 3.53×10^3 个/mL,3#点藻细胞密度为 3.18×10^3 个/mL,6#点藻细胞密度为 2.14×10^3 个/mL,与人工养殖鱼塘相比,进水口,3#点,6#点藻细胞密度显著降低,进水口由于水流速较大,藻类密度相对人工鱼塘较低,3#,6#受水生植物和滤食性鱼类的影响,与人工养殖鱼塘相比也较低,由图 2 可知,各采样点藻类群落主要以绿藻门和硅藻门为主,其中绿藻门占总数的一半以上。

2.2.2 藻类的优势种群与季节变化

研究期间,对大莲湖生态修复区所有的浮游植

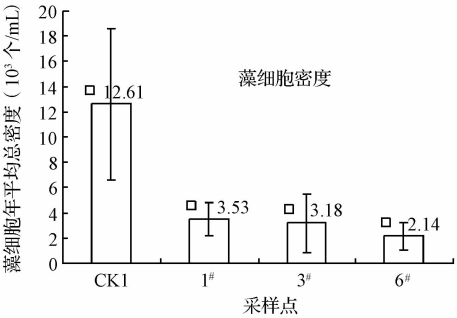


图 1 年平均藻细胞密度变化图
Fig.1 Variation of the annual average algae density

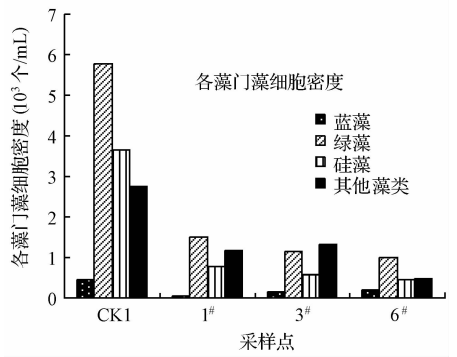


图 2 各藻门藻细胞密度变化图
Fig.2 Variation of algae density of each species

物定性分析结果进行频度统计(图 3),出现频率在 70% 的是小球藻(*Chlorella*)和小环藻(*Cyclotella*)。

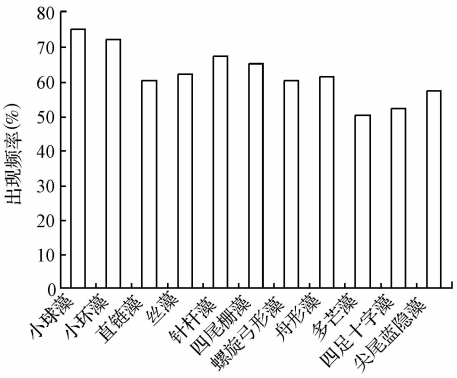


图 3 常见藻属出现频次
Fig.3 Occurrence frequency of common algae

60% 以上的是直链藻 (*Melosira*)、丝藻 (*Ulothrix*)、针杆藻 (*Synedra*)、四尾栅藻 (*S. quadricauda*)、螺旋弓形藻 (*S. spiralis*) 和舟形藻 (*Navicula*)。出现频率在 50% 以上的是多芒藻 (*Golenkinia*)、四足十字藻 (*C. quadrata*) 和尖尾蓝隐藻 (*Chr. acuta*)。

表 5 不同月份藻类的种类组成
Table 5 Composition of phytoplankton in different months (%)

	蓝藻	绿藻	硅藻	其他藻类
10月	14	57	14	15
11月	38	46	14	2
12月	6	50	0	44
1月	10	53	4	33
2月	6	54	31	9
3月	3	46	27	24
4月	2	49	17	32
5月	2	37	11	50
6月	6	13	13	68
7月	6	19	27	48

经过生态修复后,蓝藻在生态修复区的所占的比例明显下降,绿藻所占的比例也明显下降,但仍占多数,硅藻所占的比例相对稳定,其他藻类所占的比例明显上升(表 5)。

蓝藻在 10 月,11 月占有一定的比例,从 12 月份开始逐渐降低,到次年 6 月份又有所出现,但所占比例较少,绿藻一年四季都有较高的细胞密度,最高值出现在春秋季节,夏季和冬季有所降低。硅藻在一年中都有生长,隐藻在次年夏季显著上升,甲藻、裸藻及其他藻类的细胞密度较少(图 4)。

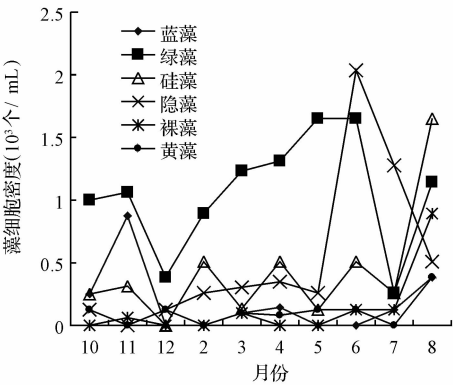


图 4 不同月份藻细胞变化图
Fig.4 Variation of algae density in different months

2.3 其他环境因子

大莲湖生态修复区原先主要由人工养殖鱼池组成,因此,生态修复区附近的一个鱼池作为对照,每月在大莲湖生态修复区内现场测定水体的 pH、水温、盐度和溶氧,并采集水样测定总氮、总磷和叶绿素。由表 6 可知,生态修复区内水体的 pH、温度、盐度和溶氧变化稳定。与对照鱼塘相比,生态修复区内水体总氮、总磷和叶绿素明显下降。

3 讨论

在湖泊生态系统中,水体中的藻类、水生植物和鱼类等分别作为不同食物链中的一环,通过捕食,竞争等关系制约其中各种生物的生物量,进而影响到水体中营养盐的吸收与转化^[9,10],因此,可以通过调控食物链环节来达到改善湖泊水质的目的。本研究从植被恢复与管理,人工增殖放流两方面入手,根据季节水温变化,有步骤的恢复生态系统。从水质状况和浮游植物的种类变化来看,取得了较显著的成果。这与国内的一些其他生态修复工程研究结果相一致^[11,12]。

鲢、鳙作为滤食性经济鱼类能够对浮游生物的摄食行为抑制蓝藻水华的发生,这种干预现象在水域生态学领域称为非经典生物操纵。目前关于鲢、鳙非经典生物操纵作用存在 2 种不同的观点。一种认为鲢、鳙大量滤食浮游生物,能够有效控制水体营养化的同时还可将水中有机物转化为鱼产品移出^[13,14];另一种观点认为,放养鲢、鳙不能抑制小型藻类的生长,并且加快了水体营养盐的周转速率,使得水体更易富营养化^[15-17]。因此,在利用鲢、鳙抑制蓝藻的同时,也应充分考虑到鲢、鳙对藻类的滤食不完全,加快水体的富营养化;本研究中,利用水生植物对富营养物质吸收从而避免单一放养鲢、鳙措施的不足。生物操纵的原理是通过鱼类结构调控来促进浮游动物大量增殖以抑制藻类生长,促进沉水植物恢复与发展。大莲湖生态修复中,先种植水生植物,待水生植物生长旺盛时,再放养少量的滤食性鱼类、杂食性鱼类和凶猛性鱼类,目的是提高沉积物再悬浮与营养盐释放,从而使营养盐从底泥最终转移到鱼类。此外,夏季较高的水温有利于蓝藻的迅速生长,在春夏季气温升高时,放养较多鲢、鳙控制藻类的生

表 6 生态修复对水体理化指标的影响
Table 6 Effects of ecological restoration on water quality

	pH	温度(℃)	盐度(‰)	溶氧(mg/L)	TN(mg/L)	TP(mg/L)	叶绿素(μg/L)
对照鱼塘	6.59 ~ 8.55	3.45 ~ 30.73	0.31 ~ 0.41	5.98 ~ 17.13	2.3 ~ 7.4	0.54 ~ 2.61	33 ~ 151
湖区	6.34 ~ 8.5	3.86 ~ 29.87	0.4 ~ 0.55	4.99 ~ 20.58	0.3 ~ 2.87	0.15 ~ 0.5	8 ~ 43

长,并放养一定量的草鱼控制水草过度生长,提高湖区的生物多样性。从实验结果来看,大莲湖的综合治理措施起到了较好的效果,藻细胞密度,蓝藻比重,水体中的营养盐均显著下降。此外,从种植水生植物的经验来看,种植水生植物后的一段时间内,会有一些水生植物的枯死,这些枯死的水生植物腐烂在水体中,会对水体造成一定的影响,且恢复水生生态系统是一个长期过程。因此,需要对这些枯死植物做清理和补种,以保证生态系统的长期稳定。目前,大莲湖生态修复区渔业资源丰富,已成为当地居民休闲娱乐的好去处,社会效益显著。

参 考 文 献

- [1] 陈开宁,包先明,史龙新,等. 太湖五里湖生态重建示范工程一大型围隔试验. 湖泊科学, **2006**, 18(2): 139-149.
Chen Kaining, Bao Xianmin, Shi Longxin, *et al.* Ecological restoration engineering in Lake Wuli, Lake Taihu: A large enclosure experiment. *Lake Science*, **2006**, 18(2): 139-149 (in Chinese)
- [2] 李文朝,潘继征,陈开宁,等. 滇池东北部沿岸带生态修复技术研究及工程示范—生态修复目标的确定及其可行性分析. 湖泊科学, **2005**, 17(4): 317-321
Li Wenchao, Pan Jizheng, Chen Kaining, *et al.* Studies and demonstration engineering on ecological restoration technique in the littoral zone of Lake Dianchi: The target and feasibility. *Lake Science*, **2005**, 17(4): 317-321 (in Chinese)
- [3] 杜桂森,刘晓端,刘霞,等. 密云水库水体营养状态分析. 水生生物学报, **2004**, 28(2): 191-196
Du Guisen, Liu Xiaoduan, Liu Xia, *et al.* Analysis on trophic state of water body in Miyun reservoir. *Acta Hydrobiologica Sinica*, **2004**, 28(2): 191-196 (in Chinese)
- [4] 孙翠慈,王友绍,孙松,等. 大亚湾浮游植物群落特征. 生态学报, **2006**, 26(12): 3948-3958
Sun Cuici, Wang Youshao, Sun Song, *et al.* Dynamic analysis of phytoplankton community characteristics in Daya Bay, China. *Acta Ecologica Sinica*, **2006**, 26(12): 3948-3958 (in Chinese)
- [5] Wang Xiaolong, Lu Yonglong, He Guizhen, *et al.* Exploration of relationships between phytoplankton biomass and related environmental variables using multivariate statistic analysis in a eutrophic shallow lake: A 5-year study. *Journal of Environmental Sciences*, **2007**, 19(8): 920-927
- [6] 朱浩,刘兴国,裴恩乐,等. 大莲湖生态修复工程对水质影响的研究. 环境工程学报, **2010**, 4(8): 1790-1794
Zhu Hao, Liu Xingguo, Pei Enle, *et al.* Studies on effects of ecological restoration on the quality of waters in Dalian Lake. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2010**, 4(8): 1790-1794 (in Chinese)
- [7] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第4版). 北京:中国环境科学出版社, **2002**
- [8] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范. 北京:中国环境科学出版社, **1990**
- [9] 王瑜,刘录三,方玉东,等. 生物操纵方法调控湖泊富营养化研究进展. 自然科学进展, **2009**, 19(12): 1296-1301
- [10] 王海珍,刘永定,肖邦定,等. 围隔中鲢和菹草控藻效果及其生态学意义. 水生生物学报, **2004**, 28(2): 141-146
Wang Haizhen, Liu Yongding, Xiao Bangding, *et al.* Ecological meaning and bloom controlling of different density of silver carp followed with *potamogeton crispus* in enclosures. *Acta Hydrobiologica Sinica*, **2004**, 28(2): 141-146 (in Chinese)
- [11] 高琼,马文林,杜桂森,等. 景观富营养水体生态修复对浮游植物群落结构的影响. 环境工程学报, **2010**, 4(3): 508-512
Gao Qiong, Ma Wenlin, Du Guisen, *et al.* Effects of ecological remediation on the phytoplankton community in eutrophic urban landscape water body. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2010**, 4(3): 508-512 (in Chinese)
- [12] 杜桂沐,张饮江,张磊,等. 鱼贝植物组合对上海白莲泾生态修复效应研究. 环境科学与技术, **2010**, 33(5): 6-11
Du Jiamu, Zhang Yinjiang, Zhang Lei, *et al.* Effect of ecological restoration by combined system of plants, fishes and shellfishes in Shanghai Bailianjing River. *Environmental Science and Technology*, **2010**, 33(5): 6-11 (in Chinese)
- [13] Smith D. W. Biological control of excessive phytoplankton growth and enhancement of aquacultural production. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **1985**, 42(12): 1940-1945
- [14] 李琪,李德尚,熊邦喜,等. 放养鲢鱼(*Hypophthalmichthys molitrix* C et V)对水库围隔浮游生物群落的影响. 生态学报, **1993**, 13(1): 30-37
Li Qi, Li Deshang, Xiong Bangxi, *et al.* Influence of silver carp(*Hypophthalmichthys molitrix* C et V) on plankton community in reservoir enclosures. *Acta Ecologica Sinica*, **1993**, 13(1): 30-37 (in Chinese)
- [15] Tao L., Fuyi C., Dongmei L. Biological control experiment of excess propagation of cyclops for drinking water security. *Journal of Environmental Sciences*, **2007**, 19(3): 290-294
- [16] Hua M., Fuyi C., Zhiquan L., *et al.* Effect of filter-feeding fish silver carp on phytoplankton species and size distribution in surface water: A field study in water works. *Journal of Environmental Sciences*, **2010**, 22(2): 161-167
- [17] 阮景荣,戎克文,王少梅,等. 罗非鱼对微型生态系统浮游生物群落和初级生产力的影响. 应用生态学报, **1993**, 4(1): 65-73
Ruan Jiongrong, Rong Kewen, Wang Shaomei, *et al.* Effect of Nile tilapia on plankton community and primary productivity of freshwater microcosms. *China Journal of Applied Ecology*, **1993**, 4(1): 65-73 (in Chinese)