

滇池东北岸生态修复区的环境效应 ——I. 抑藻效应*

潘继征 李文朝 陈开宁

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

提 要 研究了滇池东北沿岸带生态修复区抑制蓝藻水华的功能, 对比监测了修复区内外水体中 chl. a 浓度, 通过原位围隔试验研究了修复区内聚集藻类的降解过程, 测定了水生植被的遮光率及其对藻类光合作用的影响. 结果显示, 修复区具有捕获富集和分解消除漂浮性蓝藻的作用, 同时能通过水生植物的遮荫作用抑制藻类光合作用. 在蓝藻水华暴发期(7-10月)修复区内蓝藻大量聚集, chl. a 最高浓度达到修复区外的 29 倍; 聚集在修复区内的藻类在微生物作用下迅速降解, chl. a 降解过程符合一级反应动力学方程, 反应系数为 $k=0.2173$ (时间单位为天); 修复区内挺水植被的遮光率可以达到 90% 以上, 能降低植被区内水体中藻类光合作用强度 60% 左右.

关键词 滇池 沿岸带 生态修复 抑藻效应

分类号 Q147

在湖泊治理过程中, 生态修复的重要性已经为人们所认识, 并将其列为湖泊治理三个重要步骤之一, 在时间次序上排在外源污染控制和内源污染清除之后, 认为生态修复是体现湖泊治理效果的必须环节^[1].

沿岸带生态修复是整个湖泊生态修复的重要部分, 其意义不仅在于恢复良性生态, 更重要在于其显著的环境效应. 沿岸带处在湖泊水体与陆地的边界, 生态良好的沿岸带是拦截净化来自陆地污染的天然屏障, 许多研究和实践结果已经证实了这一点^[2, 3]; 就沿岸带对藻类的控制效应国内外也有过一些研究, 大部分从沿岸带大型水生植物的抑制藻类光合、生化克藻作用、沿岸带水生动物对藻类的捕食作用等方面考虑, 得出了肯定的结果^[4-7]; 在严重富营养化湖泊中, 沿岸带生态如何影响蓝藻水华的聚集和分解转化, 尚未见相关的研究报道.

在科技部重大项目“滇池污染控制技术研究”(K99-05-35-01)中, 将“沿岸带生态修复技术及工程示范”专题列入“滇池蓝藻水华污染控制技术研究”课题, 旨在滇池东北岸水质严重污染、风浪强烈侵蚀、蓝藻水华堆积条件下, 研究掌握沿岸带生态修复成套技术, 建设技术示范工程, 并研究揭示其环境生态效应, 为滇池及类似湖泊的岸带生态修复、污染治理和蓝藻控制提供理论依据和实用技术. 滇池沿岸带生态修复技术示范工程于 2002 年初步建成, 2003 年对生态修复区的环境生态效应进行了研究, 揭示了严重富营养化条件下迎风岸生态修复在捕获富集、分解去除蓝藻方面的显著功效, 证明湖泊沿岸带生态修复可以作为控制

* 科技部重大项目“滇池污染治理技术研究”(K99-05-35-01)资助.

2003-12-26 收稿; 2004-02-20 收修改稿. 潘继征, 男, 1975 年生, 助理研究员.

蓝藻水华的重要手段, 优先实施. 本文对这一研究结果进行初步总结和讨论, 以供参考.

1 滇池沿岸带生态修复技术示范工程概况

滇池蓝藻水华污染控制技术课题试验区位于昆明市官渡镇宝丰村(半岛)东、西两侧湖湾内(简称东湾、西湾), 面积 6 km^2 , 外围设有阻隔设施. 沿岸带生态修复技术示范工程位于课题实验区东湾(图 1), 跨 520 m 岸段, 面积 6.7 hm^2 .

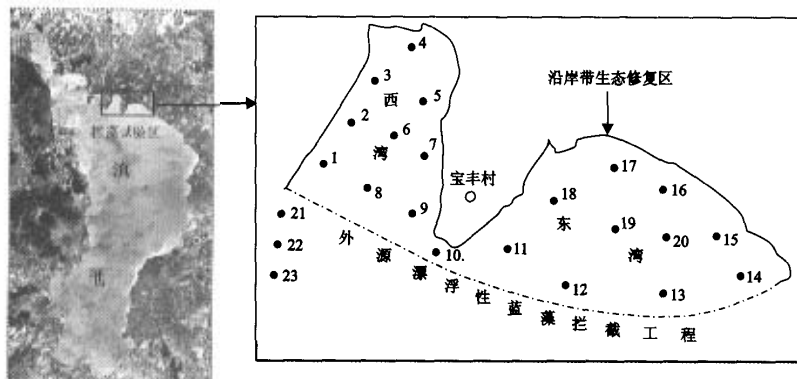


图 1 沿岸带生态修复技术示范区在滇池蓝藻水华污染控制试验区的位置

Fig. 1 Sketch of the sampling sites in the zone of researching area of project, Dianchi Lake

滇池地区盛行西南风, 生态修复区处在迎风岸, 风浪冲刷十分强烈, 观测到冬春季节平均波高 0.35 m , 最大波高 1.10 m . 湖岸为混凝土大堤, 原有湖滩湿地已经被围垦, 湖堤前沉积物受到风浪的长期侵蚀, 仅留下粗沙. 水位年变幅约 1 m , 最高水位出现在 8-10 月, 生态修复区水深在 $0.35-1.40 \text{ m}$; 最低水位出现在 4-5 月, 修复区约有 $1/3$ 的面积露出沙滩. 生态修复区挺水植被于 2002 年建成, 主要由东方香蒲 (*Typha orientalis* Presl)、狭叶香蒲 (*Typha angustifolia* L.)、茭草 (*Zizania latifolia* Turcz.)、芦苇 (*Phragmites communis* Trin.) 形成的单优势种群落或混合群落斑块状镶嵌而成, 覆盖度在 85% 以上. 在挺水植物带外侧由马来眼子菜 (*P. malaianus* Miq.)、穗花狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum* L.) 等组成沉水植物群落, 群落盖度 30% 左右(图 2).

2 试验方法

2.1 生态修复区内外藻类监测

在生态修复区内、外共设 13 个采样点, 分为五组, 1-3 号在芦苇群落内, 4-6 号在狭叶香蒲群落内, 7-9 号在马来眼子菜群落内, 10 号在东方香蒲群落内, 11 号在茭草群落内, 12、13 号为修复区外对照点(图 2). 2003 年 3 月-11 月, 每月进行一次水质采样分析和植物群落调查, 水质分析项目为 chl. a.

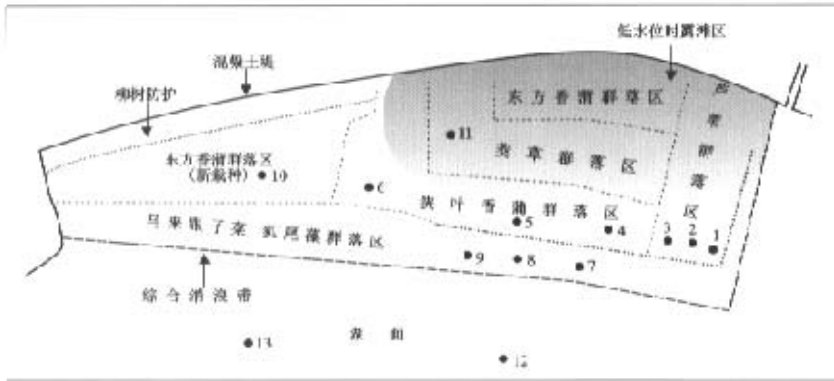


图2 沿岸带生态修复区水生植物群落分布及水质监测样点
Fig. 2 Sketch of the sampling sites and distribution of communities
in the zone of ecological restoration, Dianchi Lake

2.2 藻类降解动力学原位围隔实验

原位实验装置为圆柱形无底围隔,直径0.64 m,材料为柔性透明塑料膜,上、下口用硬质塑料箍固定。布设时将下口塑料箍插入底泥中,上口塑料箍固定在泡沫浮体上高出水面,能随水位上下浮动。由于采用柔性透明材料,围隔内、外水位一致,无水流交换;围隔内光照基本不受影响。

在狭叶香蒲群落、芦苇群落、马来眼子菜群落各设3个实验点(藻类监测1-9号点),每个试验点布设1个实验围隔,布设后每2d对围隔内水体中chl. a含量进行采样测定,采样方式为柱状混合水样,同时观测水深和透明度。在蓝藻水华暴发期(4-10月),分别在4、6、8、10月份进行一次原位围隔实验,每次实验持续时间为1个月。

2.3 挺水植物遮光效应实验

在狭叶香蒲群落和芦苇群落中各设定3个实验点(藻类监测1-6号点),同时设2个对照点(藻类监测12、13号点),从2003年3月-11月,结合藻类监测,同步开展挺水植物遮光率、藻类生物量及初级生产力测定^[8]。

蓝藻水华污染控制技术课题研究课题试验区的水质监测由项目委托云南省环境监测中心站监测,采样布设见图1,本文仅利用其部分资料。

3 实验结果

3.1 生态修复区内、外chl. a含量

在4-5月份,生态修复区内chl. a含量低于对照区。6月份生态修复区与对照区一致,7-9月份生态修复区内chl. a大量富集,9月份达到高峰,平均含量是对照区的29倍。

表 1 2003 年生态修复区内、外 chl. a 浓度变化趋势(单位:mg/m³)^{*}

Tab. 1 The change of Chl. a in and out of the zone of ecological restoration, 2003

月 份	3	4	5	6	7	8	9	10	11
马来眼子菜群落	38.7	41.9	52.7	60.1	337.2	765.9	2238.0	272.6	-
芦苇群落	37.4	42.8	78.0	110.4	539.1	1584.5	3210.5	411.3	184.9
东方香蒲群落	63.6	73.3	99.3	123.5	827.5	2792.3	4572.8	531.5	295.7
狭叶香蒲群落	28.3	32.8	40.6	136.5	639.3	2534.3	4120.3	443.4	107.3
修复区平均	42.0	47.7	67.7	107.6	585.8	1919.3	3535.4	414.7	196.0
对照区	50.0	58.2	84.5	107.4	101.2	183.0	121.9	101.9	87.0
修复区/对照区	0.84	0.82	0.80	1.00	5.79	10.49	29.00	4.07	2.25

* 茭草群落区(11号点)处于露滩状态,监测数据不全。

3.2 藻类降解动力学原位围隔实验

原位围隔实验结果见图 3。在 4、6 月份,生态修复区内 chl. a 含量较低,试验结果 chl. a 含量呈缓慢增高趋势,说明藻类仍然可以生长繁殖。在 8、10 月份,生态修复区内蓝藻大量聚集,chl. a 含量达到 1000 - 5000 mg/m³,试验结果 chl. a 含量呈指数下降趋势,说明藻类大量死亡分解,丧失光合作用能力。

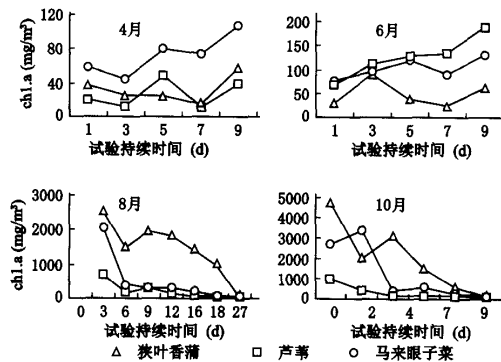


图 3 不同群落区原位实验中 4 - 10 月 chl. a 平均值的变化

Fig. 3 The fluctuations of average Chl. a in the enclosed tester of various communities from Apr. to Oct.

3.3 挺水植物的遮光效应

在蓝藻水华爆发季节(6 - 10 月),狭叶香蒲群落和芦苇群落的生物量和遮光效果正处于最优的状态,生物量分别达到 21.8 kg/m² 和 13 kg/m²(鲜重),遮光率分别为 94.6% 和 93% (图 4)。

挺水植物的遮光效应显著降低了群落内水体中浮游藻类的初级生产力,狭叶香蒲群落

和芦苇群落内浮游藻类的净初级生产力分别降低 66.1% 和 59.6% (表 2)。

表 2 香蒲群落和芦苇群落遮光效应对浮游植物初级生产力的影响

Tab. 2 Effect of the light covered in the communities of the cattail and bulrush on the primary productivity of the phytoplankton

群落类型	水面光强 (lx)	遮光率 (%)	净初级生产力 ($\text{mgO}_2 / (\text{L} \cdot \text{d})$)	生产力降低 (%)	备注
开阔水面	40000	0	6.2	0	平均水温 20℃
狭叶香蒲群落	2160	94.6	2.1	66.1	chl. a 平均含量
芦苇群落	2800	93	2.5	59.6	150.5 mg/m^3

4 分析与讨论

4.1 生态修复区对飘浮性蓝藻的捕获富集及分解去除作用

实验结果表明,生态修复区内藻类生产力受到明显抑制,生态修复区内的蓝藻堆积完全由大湖面蓝藻的漂移集聚而形成,沿岸带生态修复区具有捕获富集蓝藻的作用.生态修复区位于迎风岸,在蓝藻水华暴发季节,漂浮性蓝藻在西南风作用下随着风生层流进入生态修复区,在那里聚集;当风向转为偏北风时,由于挺水植物的遮盖,风力影响不到生态修复区内聚集的蓝藻;当风向转为西南风时,漂浮性蓝藻继续向生态修复区聚集,因而形成蓝藻大量堆积,这一过程发生在 6-9 月 (图 5)。

聚集在生态修复区内的蓝藻在微生物作用下迅速降解,对 10 月份原位围隔试验结果进行分析,证明蓝藻的降解过程完全符合一级反应动力学方程:

$$V = -\frac{d[A]}{dt} = k[A]$$

$$\int_{[A_0]}^{[A]} -\frac{d[A]}{[A]} = k \int_0^t dt$$

$$-\ln[A] + \ln[A_0] = kt$$

$$\ln[A] = \ln[A_0] - kt$$

$$A = A_0 e^{-kt}$$

其中 V 为反应速度, A 为藻类浓度, A_0 为初始藻类浓度, t 为反应时间, k 为反应速度常数^[9]. 原位围隔试验以 chl. a 浓度代表活性藻类数量,与试验时间 t 之间的反应动力学方程为:

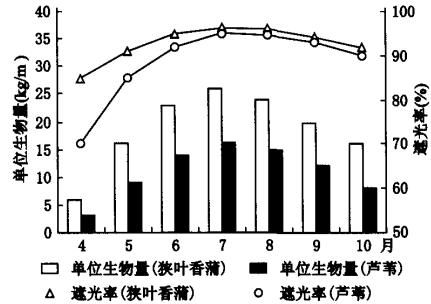


图 4 2003 年 4-10 月香蒲群落、芦苇群落生物量及其遮光率的变化

Fig. 4 The fluctuations of the productivity and the effectivity of light covered in the communities of cattail and bulrush from Apr. to Oct. 2003

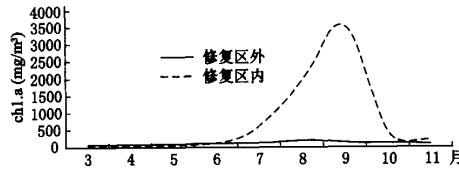


图 5 2003 年修复区内外、湖水中 Chl. a 含量差异及其变化趋势
 Fig. 5 The change of Chl. a of the lake water in and out of the zone of ecological restoration in 2003

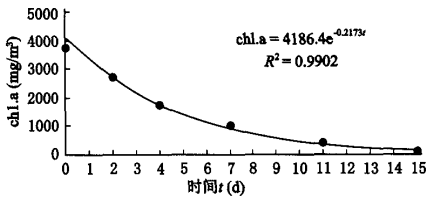


图 6 蓝藻聚集期在隔离条件下(原位围隔试验)修复区湖水中 chl. a 的降解动力学过程
 Fig. 6 The changing process of the chl. a in the isolated tester during the alga blooming

$$chl. a = A_0 e^{-kt}$$

回归分析结果: $A_0 = 4186.4$, $k = 0.2173$.

chl. a 降解动力学方程(图 6)为:

$$chl. a = 4186.4 e^{-0.2173t}$$

进入 10 月份之后,大湖面蓝藻水华衰退,生态修复区内失去蓝藻补充,蓝藻聚集现象迅速消失,说明残存的蓝藻在短时间内就可以被分解.

2003 年生态修复区水温观测结果,7-10 月份湖水月均温度介于 20-25℃ 之间,比较稳定,chl. a 的降解速度比较恒

定,上述 chl. a 降解动力学方程可以用在这一时期生态修复区 chl. a 降解总量的估算:

$$chl. a \text{ 日降解量} = \text{现存量 } A \times \text{降解反应常数 } k$$

对每天的降解量进行累加,可得 7-10 月份生态修复区水体中 chl. a 降解量为 53.03 g/m³. 蓝藻 chl. a 与干重之间换算系数按 70 估算^[10],7-10 月份生态修复区水体中蓝藻降解量(干重)约为 3.7 kg/m³. 结合生态修复区面积、水下地形及水位观测资料,估算出 7-10 月份生态修复区水体中蓝藻降解总量(干重)约为 101 t.

4.2 生态修复区内藻类生产力的控制

实验结果表明,生态修复区内的挺水植物可以通过遮荫作用限制藻类生产力,这主要发生在 11-6 月没有蓝藻堆积现象的时段. 根据初级生产力测定结果,结合生态修复区挺水植被面积、水下地形、水位观测资料、湖水中 chl. a 含量等资料,估算出 11-6 月份挺水植被区藻类因遮荫而减少生产力 468 gO₂/m²,同期内整个挺水植被区共减少藻类生产量 21.9 t.

4.3 对整个东湾试验区藻类数量的影响

依据课题实验区内外水质监测资料,对东湾试验区、西湾试验区和对照点在沿岸带生态修复技术示范工程建设前(2001 年)后(2003 年)的 chl. a 含量变化情况进行对比分析,结果见表 3. 对照点代表开敞湖面,chl. a 含量降低了 25.8%,这反映了全湖性蓝藻水华程度的年际波动. 西湾试验区采取了机械除藻和高密度鲢鱼控藻措施, chl. a 含量降低了 44.6%,

说明控藻措施是有效的. 东湾试验区采取了沿岸带生态修复和少量放养鲢鱼等控藻措施, chl. a 含量降低了 53.3%, 说明沿岸带生态修复的控藻效果更为显著.

表 3 试验区不同区域 chl. a 年度平均值变化(单位:mg/m³)

Tab. 3 The change of Chl. a in the various area of the researching zone and control

区域	蓝藻控制措施	2001 年 Chl. a	2003 年 Chl. a	2003 年比 2001 年降低(%)
东湾	沿岸带生态修复 + 低密度放养鲢鱼	192.86	90	53.3
西湾	机械除藻 + 高密度放养鲢鱼	250.00	138.57	44.6
对照	开敞湖面	127.14	94.28	25.8

5 结论

(1) 滇池沿岸带生态修复的控藻效果是极为显著的, 在 2003 年度, 6.7 hm² 的生态修复区捕获富集和分解消除蓝藻 101 t(干重), 通过挺水植物遮荫作用减少藻类生长量 21.9 t(干重), 使得沿岸带生态修复技术示范工程所在的东湾试验区藻类平均现存量比实施该工程前减少了 53.3%.

(2) 修复区内蓝藻大量聚集和分解主要发生在蓝藻水华暴发期 7-10 月, chl. a 最高浓度达到修复区外的 29 倍; 聚集在修复区内的藻类降解过程符合一级反应动力学方程, 反应系数为 $k = 0.2173$ (时间单位为天).

(3) 修复区内挺水植被对藻类生长的遮荫抑制效应主要在 11-6 月份起作用, 对藻类净初级生产力的削减率可以达到 60% 以上.

(4) 沿岸带生态修复可以作为滇池控制蓝藻水华的实用措施, 优先在东北沿岸带实施, 可有效减轻海埂一带的蓝藻水华灾害; 同样可以在其他蓝藻水华较严重的湖泊推广应用.

参 考 文 献

- 1 金相灿. 湖泊富营养化控制和管理技术. 北京: 化学工业出版社, 2001
- 2 刘文祥. 人工湿地在农业面源污染控制中的应用研究. 环境科学研究, 1997, 10(4): 15-19
- 3 尹澄清, 兰智文, 晏维金. 白洋淀水陆交错带对陆源营养物质的截留作用初步研究. 应用生态学报, 1995, 6(1): 76-80
- 4 庄元益, 赵凡等. 高等水生植物对藻类生长的克制效应. 环境科学进展, 1995, 3(6): 44-49
- 5 刘建康, 谢平. 揭开武汉东湖蓝藻水华消失之谜. 长江流域资源与环境, 1999, 8(3): 312-319
- 6 孙文浩, 俞子文, 余叔文. 城市富营养化水域的生物治理和风眼莲抑制藻类生长的机理. 环境科学学报, 1989, 9(2): 188-195
- 7 Wetzel R G. Factors influencing photosynthesis and excretion of dissolved organic matter by aquatic macrophytes in hard water lakes. *Verh Int Verein Limnol*, 1969, 17: 72-85
- 8 黄祥飞, 陈伟民, 蔡启铭等. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 2000
- 9 高廷耀. 水污染控制工程. 北京: 高等教育出版社, 1996
- 10 Hu Weiping. A model for the effects of water hyacinths on water quality in an experiment of physico-biological engineering in Lake Taihu, China. *Ecological Modelling*, 1998, 107(2): 171-188

A Study on the Environmental Effect in the Zone of Restoration of Aquatic Plants Covered at the Northeast of Dianchi Lake: I. The Effect on the Controlling of Alga Blooming

PAN Jizheng, LI Wenchao & CHEN Kaining

(Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

Abstract

This paper mainly deals with the effect of the alga blooming controlled in the restoration zone covered by aquatic plants in the northeast of Dianchi Lake. The restoration mainly combined with the communities of *Typha orientalis* Presl., *Typha angustifolia* L., *Zizania latifolia* Turcz., *Phragmites communis* Trin., *P. malaianus* Miq., and *Myriophyllum spicatum* L. Comparing the concentration of Ch1. a of the restoration zone with the control's, the process of the changing of the alga with the enclosing test was analyzed. The result showed that the restoration zone had a high efficiency of algae enriching. The concentration of Ch1. a in the side of the zone was about as 29 times as the control during the alga blooming. In certain time (from Jul. to Oct., 2003), the efficiency of the treatment for the concentration of Ch1. a can be more than 90%. From the research, we found that the decomposing process of the alga during the alga blooming accord with the kinetic equation of the first grade with the coefficient $k = 0.2173$, and the ability of the treatment for the alga can get $3.7\text{kg}/\text{m}^3$ in the restoration zone. At the same time, the efficiency of shading light of the emergent plant in the restoration zone can be more than 90%, and the photosynthesis rate of the alga also decreased about 60%.

Keywords: Dianchi Lake; aquatic plants; ecological restoration; effect of controlling algal