

湖泊蓝藻水华暴发、 危害与控制

杨柳燕 肖琳 著



科学出版社

湖泊蓝藻水华暴发、 危害与控制

杨柳燕 肖琳 著

本书出版受到下列基金项目联合资助

- 国家重点基础研究发展计划(2008CB418102)
- 国家水专项(2009ZX07106-001-002)
- 国家自然科学基金(30770414,40371102)
- 国家重点基础研究发展计划(2008CB418003)
- 国家科技支撑计划(2006BAJ08B01-02)

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书在阐述了湖泊富营养化和蓝藻水华暴发现状的基础上,较系统地论述了蓝藻生长、生态和湖泊元素生物地球化学循环的最新研究成果。主要内容包环境因子引发微囊藻暴发式繁殖的过程、微囊藻水华与附生细菌的交互作用、蓝藻暴发对水生态系统的作用,同时论述了蓝藻暴发灾害与藻毒素毒性和蓝藻控制等技术,努力从湖泊水生态系统的不同水平,特别是从微生物在湖泊富营养化过程和蓝藻水华暴发过程中的作用来阐述研究的最新进展。

本书适合作为研究生教材,也适合作为环境领域特别是从事湖泊管理领域广大科研和管理人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

湖泊蓝藻水华暴发、危害与控制/杨柳燕,肖琳著. —北京:科学出版社, 2011

ISBN 978-7-03-030669-2

I. ①湖… II. ①杨… ②肖… III. ①湖泊-蓝藻纲-藻类水华-研究 IV. ①Q949.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 053144 号

责任编辑:彭胜潮/责任校对:包志虹

责任印制:钱玉芬/封面设计:王浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

深海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年4月第一版 开本:787×1092 1/16

2011年4月第一次印刷 印张:18 1/4

印数:1—1 200 字数:416 000

定价:69.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 言

在《湖泊蓝藻水华暴发、危害与控制》一书出版之际,我作为第一位读者,读后受益匪浅,感到由衷高兴。该书从论述湖泊富营养化现状与水华蓝藻开始,阐述了不同环境因子对微囊藻水华暴发的作用,表明蓝藻水华的暴发不仅与水体中氮磷营养盐浓度有关,而且与湖泊地理、水文和气象条件等因素有关。在蓝藻水华暴发过程中,附生细菌也对蓝藻生长与磷代谢产生影响,附生细菌的存在有利于水华蓝藻的生长和营养盐的再生。湖泊蓝藻水华的暴发有利于水体的生物脱氮,促进湖泊水生态系统中氮素的去除。湖泊蓝藻水华暴发对鱼类和大型水生植被的生长产生不利影响,产生的藻毒素等藻华衍生物对水生生物和人体健康具有潜在的风险。该书还介绍了利用赖氨酸、病毒控制蓝藻技术,提出了湖泊水生态系统恢复过程中水生植被资源化利用的方法和蓝藻制氢研究的最新进展,最后论述了湖泊藻华暴发、成灾和控制方法的研究进展和展望,多层次、多方位地研究湖泊蓝藻水华形成、发展和调控的方法,大大丰富了湖泊生态学研究的内容。对湖泊蓝藻水华暴发进行全生命周期研究是该书的主要特色。

该书内容丰富,论述清晰,文字流畅,力求全面反映富营养湖泊生态环境研究的最新进展。该书从水体、沉积物到蓝藻、微生物等多个方面反映了湖泊蓝藻水华研究的进展,同时也融入了作者多年来在这一领域的研究成果。因此,该书对于控制湖泊水污染和保护太湖水环境、修复太湖水生态系统可以提供一定的理论知识和技术方法支持。对于从事湖泊环保科研工作的人员来说,该书是一本给人有所启迪的参考书,对于从事湖泊环保有关的领导和管理工作来说,深信也能从中受益。

张全兴

2010年12月

前 言

湖泊水环境是一个复杂的系统,富营养化过程和蓝藻水华暴发是各种环境因子相互作用的结果,环境条件引发蓝藻暴发,蓝藻暴发也可以改变环境因子,因此是一种交互过程,形成正或负反馈作用状态,从而导致湖泊富营养化不易控制。从湖泊生态系统结构来看,微生物(蓝细菌,即蓝藻)既是初级生产者,更是分解者,在湖泊营养盐流动和物质循环过程中发挥重要的作用,因此,本书重点从微生物的角度审视湖泊富营养化过程和蓝藻水华暴发的机理。在结构编排上,本书重点探讨湖泊蓝藻暴发的过程,然后指出藻华引发的危害,最后提出控制技术,力求在不同层面上给读者展示本课题组最新的研究成果。

本书共分七章,主要由杨柳燕、肖琳、武俊、蒋丽娟、王晓琳等参加编著,其中第一章由杨柳燕和曾巾编写,第二章由杨柳燕和史小丽等编写,第三章由蒋丽娟和肖琳编写,第四章由杨柳燕和武俊等编写,第五章由杨柳燕和秦文弟等编写,第六章由杨柳燕和肖琳等编写,第七章由杨柳燕和王晓琳编写。同时参加科研的研究生有史小丽、赵兴青、曾巾、孔倩、张奕、秦文弟、揣小明、郑小红、肖元庚、詹忠、许晨红、陈小峰、矛矛和仇雪等。

在本书的编写过程中,得到了南京大学环境学院孔志明、尹大强和王晓蓉等教授的大力支持,在此表示衷心的感谢,同时感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所秦伯强、高光、吴庆龙和孔繁翔等研究员在科研过程中的支持和帮助。

本书力求反映湖泊富营养化过程和蓝藻水华暴发研究的最新成果,使之不仅适合作为研究生的教材,也适合作为相关科研人员和技术管理人员的参考用书,同时也为湖泊环境保护工作和社会经济发展提供有力的支持。

当然,在本书撰写过程中,由于作者水平和时间的限制,难免有遗漏和错误之处,希望广大读者和同行批评指正,以利于我们进一步提高。

目 录

序言

前言

第一章 湖泊生态与水华蓝藻	1
第一节 湖泊富营养化和藻华	1
一、世界湖泊富营养化和藻华现状	1
二、国内湖泊富营养化和藻华现状	2
三、太湖富营养化和蓝藻水华	5
第二节 湖泊水华蓝藻	8
一、蓝藻生物学特征	8
二、湖泊蓝藻种类	10
三、蓝藻在湖泊中分布	15
第三节 湖泊营养元素生物地球化学循环	16
一、氮素生物地球化学循环	16
二、磷素生物地球化学循环	20
三、碳素生物地球化学循环	25
参考文献	27
第二章 环境因子与微囊藻水华暴发	30
第一节 营养盐与铜绿微囊藻生长及代谢	30
一、外源性磷浓度与铜绿微囊藻生长	30
二、不同形态磷源与铜绿微囊藻磷代谢	34
三、不同氮磷比与铜绿微囊藻生长	38
第二节 水文、气象因子与微囊藻水华暴发	42
一、温度与铜绿微囊藻生长和磷代谢	42
二、光照时间与铜绿微囊藻生长及外源性磷迁移	46
三、扰动与铜绿微囊藻生长及外源性磷迁移	49
四、水文、气象因子对铜绿微囊藻生长及磷分配影响	52
第三节 其他环境因子与微囊藻水华暴发	56
一、氧化还原电位与铜绿微囊藻生长	56
二、氧化还原电位与微囊藻的磷代谢	59
三、铜绿微囊藻密度与其生长和磷代谢	65
参考文献	70
第三章 微囊藻水华与附生细菌的交互作用	71
第一节 微囊藻水华中的附生细菌	72

一、微囊藻水华中附生细菌的分离	72
二、不同生长相微囊藻提取液对附生假单胞菌生长的影响	73
三、不同初始浓度附生菌对微囊藻生长的影响	73
第二节 铜绿微囊藻和附生细菌的磷代谢	74
一、铜绿微囊藻和附生细菌对磷酸盐的竞争吸收	74
二、铜绿微囊藻和附生假单胞菌的磷释放及相互影响	79
三、不同形态磷源下铜绿微囊藻与附生假单胞菌的磷代谢	84
第三节 环境因子对微囊藻与附生细菌磷代谢的影响	89
一、pH、氧化还原电位和温度	90
二、氮磷比	101
三、环境因子交互作用	105
四、藻菌间磷微循环	109
第四节 藻华水体微生物群落演替	118
一、藻华暴发对微生物分布的影响	118
二、附生细菌在模拟藻华上定殖	125
三、总结	127
参考文献	128
第四章 蓝藻暴发对水生态系统的影响	130
第一节 微囊藻对水体氮脱除的作用	130
一、不同氮源对微囊藻氮转化的影响	131
二、不同初始 pH 对铜绿微囊藻氮转化的影响	134
三、太湖藻华水体对氮转化潜力	138
第二节 蓝藻暴发与水体中氮、磷迁移	139
一、蓝藻对磷在水体中迁移的作用	140
二、太湖中蓝藻加速营养盐的循环	143
第三节 蓝藻暴发对水生态系统的作用	146
一、蓝藻暴发对大型水生植物的影响	147
二、蓝藻暴发对鱼类等水生动物的影响	163
三、水生态系统群落结构对蓝藻水华的响应	168
参考文献	170
第五章 蓝藻暴发灾害与藻毒素	171
第一节 蓝藻暴发灾害	171
一、蓝藻暴发对饮用水危害	171
二、蓝藻暴发对渔业危害	172
三、蓝藻暴发对旅游休闲等影响	173
第二节 蓝藻毒素种类、产生机制和时空分布	173
一、蓝藻毒素种类	174
二、蓝藻毒素产生机制	179

三、蓝藻毒素在湖泊中时空分布·····	182
第三节 蓝藻毒素的毒作用机理及危害·····	183
一、蓝藻毒素的毒作用机理·····	183
二、蓝藻毒素的危害·····	189
第四节 蓝藻毒素在环境中迁移转化·····	193
一、蓝藻毒素的生物积累·····	193
二、蓝藻毒素的物理化学降解·····	197
三、蓝藻毒素的生物降解·····	201
参考文献·····	204
第六章 湖泊蓝藻控制与资源化·····	211
第一节 赖氨酸对铜绿微囊藻生长的控制·····	212
一、赖氨酸对不同品系铜绿微囊藻生长的抑制作用·····	212
二、赖氨酸对铜绿微囊藻光合作用系统的影响·····	216
三、赖氨酸对铜绿微囊藻的毒理效应·····	221
第二节 蓝藻病毒控藻·····	226
一、蓝藻病毒研究的历史和现状·····	226
二、蓝藻病毒的分类与命名·····	227
三、蓝藻病毒的分子生物学和控藻·····	228
第三节 水生植物资源化·····	231
一、微生物固体发酵高等水生植物生产蛋白饲料·····	232
二、微生物固体发酵高等水生植物生产纤维素酶制剂·····	242
三、水生植物压滤液厌氧发酵·····	249
第四节 蓝藻制氢·····	257
一、藻类制氢代谢途径·····	257
二、蓝藻产氢的开发展望·····	260
参考文献·····	261
第七章 湖泊藻华研究进展与展望·····	263
第一节 湖泊藻华暴发机理·····	263
一、蓝藻自身生理生化特性·····	263
二、蓝藻水华形成的外部条件·····	266
第二节 湖泊蓝藻成灾过程和机理·····	271
第三节 湖泊富营养化控制技术·····	272
一、减少入湖外源性营养负荷的技术·····	272
二、湖泊内源营养负荷控制技术·····	273
三、蓝藻水华控制·····	274
四、湖泊生态恢复·····	278
第四节 湖泊生态与藻华研究展望·····	279
参考文献·····	280

第一章 湖泊生态与水华蓝藻

第一节 湖泊富营养化和藻华

一、世界湖泊富营养化和藻华现状

随着人类活动的加剧,大量营养物通过各种途径进入湖泊水体。国际经济发展合作组织将这种“水体中由于营养盐的增加而导致藻类和水生植物生产力增加、水质下降等一系列变化,从而使水用途受到影响”的现象定义为“湖泊富营养化”(OECD, 1982),并给出了相应的评价标准。目前,水体富营养化已是世界各国面临的严峻的水污染问题之一。在 20 世纪初,水体富营养化问题已引起了生态学家、湖沼学家的广泛注意;与此同时,水体富营养化问题也得到一些国际组织、国家政府及社会各界人士的关注与重视(马经安等, 2002)。在 20 世纪 60 年代末,联合国粮农组织(FAO)、联合国教科文组织(UNESCO)、世界卫生组织(WHO)、欧洲经济共同体(EEC)以及经济合作与发展组织(OECD)等众多国际组织开始在其计划中设立研究专项。1973 年 OECD 曾在其 18 个成员国之间建立了国际富营养化研究合作计划,通过在世界范围内开展的大量研究,确定水体中总磷、总氮含量是水体富营养化程度的重要指标,是产生水体富营养化的主要原因和物质基础。

来自联合国环境规划署(UNEP)的一项水体富营养化调查结果表明(表 1.1),在全球范围内 30%~40%的湖泊和水库遭受不同程度影响,各地区受影响的情况相差悬殊。世界上大部分的大型湖泊未受影响,水质良好;而在气候干燥地区,水体富营养化情况相对严重(马经安等, 2002)。

表 1.1 世界湖泊和水库营养化状况^①

地区或国家	贫营养/%	中营养/%	富营养/%	抽样水体个数
OECD ^② +加拿大	48	16	36	230
OECD+加拿大+其他国家	30	35	35	335
加拿大	73	15	12	129
美国	1	23	76	493
意大利	29	28	43	65
德国	8	38	54	72
波罗的海沿岸国家	15	35	47	130
日本+其他国家	25	39	36	36
中国	44	32	24	32
11 个 PAHO ^③ 国家	24	20	56	25
南非水库	31	41	28	32

注: ①此表引自联合国环境规划署关于“水体富营养化”调查研究;

②OECD 指经济合作与发展组织;

③PAHO 泛指美洲卫生组织。

近些年来,世界各国普遍重视湖泊环境的演变,目前欧洲湖泊所面临的最大问题是湖泊富营养化问题,在统计的 96 个湖泊中有 80% 的湖泊不同程度地受到氮、磷的污染,呈现富营养化状态。在北美洲最受人关注的五大湖泊中,苏必利湖水质最好,属贫营养湖泊;休伦湖和密执安湖处于中营养状态;而伊利湖和安大略湖则水质相对较差,属富营养型湖。亚洲湖泊水质南北差异较大,北部湖泊水质较好,而南部湖泊水质较差;亚洲湖泊水质的主要特点是水中氮、磷含量偏高。亚洲南部大部分湖泊富营养化问题突出,适宜的自然条件和湖中营养盐容易引起水华。此外,亚洲大部分城市湖泊接受生活污水较多,高锰酸盐指数(COD_{Mn})和生化需氧量(BOD)均超标严重(蒋火华等, 2000)。

湖泊富营养化本来是一个自然过程,在自然条件下湖泊富营养化只是湖泊演变过程的一个阶段,在人为作用下可不断加速,近年来还与全球气候变化有关。由于水文、气象等多方面作用,浅水湖泊在自然状况下比深水湖泊更容易产生富营养化。人类活动加剧了湖泊富营养化的过程,使这一问题在经济快速发展的同时更加凸显。气候变化会导致大气环流改变、降水时空分布不均一、湖泊分层现象加剧、营养物质更多的进入湖泊和极端天气事件增多等一系列危害。气候变化产生的效应是复杂的,对湖泊富营养化的影响也是多方面的,主要从生物和非生物两个方面产生效应。就现有的研究而言,多数认为气候变化,特别是温度升高的累积效应,会加剧湖泊的富营养化。

与湖泊富营养化相伴随的一个普遍现象就是许多浮游植物,尤其是那些具有浮力或者运动能力的藻类,通常会大量繁殖,形成藻类水华,从而导致水质下降以及一系列严重的水环境问题。“水华”一词通常大多是指浮游植物的生物量显著地高于一般水体中的平均值,并在水体表面大量聚集,形成肉眼可见的藻类聚集体。在形成水华时,水体中叶绿素 a(Chl-a)的浓度一般在 10 $\mu\text{g}/\text{L}$ 以上(孔繁翔等, 2005)。淡水藻类的大部分类群都可以形成有害水华,包括属于真核藻类的绿藻、甲藻、隐藻、金藻等,以及属于原核生物的蓝藻。其中,蓝藻水华发生的范围最广,危害最大,对生态和人类健康的危害最为严重。

蓝藻水华主要出现在淡水水体,由于水华在水体表面大量堆积,不仅影响水体景观,而且作为饮用水源地时蓝藻产生的毒素以及异味物质等将会给自来水处理以及饮用水安全带来严重危害。蓝藻水华受到关注的重要原因之一就是因为蓝藻能产生各种各样的天然毒素,主要是环肽、生物碱和脂多糖内毒素,其中以肝毒性的微囊藻毒素(MC-LR)危害最大,受到广泛关注。世界卫生组织(WHO)制订了饮用水中 MC-LR 的最大可接受浓度为 1.0 $\mu\text{g}/\text{L}$; 澳大利亚、新西兰、加拿大和中国等也制订了饮用水中的 MC-LR 标准,等同或者接近于 WHO 的指导值(谢平, 2007)。蓝藻毒素与许多人工合成的有机污染物不同,只要水体中有产毒蓝藻存在,它就可以源源不断地产生并被大量释放到水体中,危害生态安全和人类健康。因此,蓝藻水华的成因、危害和控制对策成为学术界关注的重要问题之一。

二、国内湖泊富营养化和藻华现状

中国幅员辽阔,江河、湖泊和水库众多。据统计(金相灿, 1995),面积大于 1 km^2 的湖泊有 2305 个(不含时令湖);湖泊总面积为 71787 km^2 ,约占全国陆地总面积的 0.8%;总

蓄水量 7088 亿 m^3 , 占我国水资源总量的 27%, 是我国重要的水资源。按湖泊地理分布的特点, 全国可划分为五个主要湖区, 即青藏高原湖区、东部平原湖区、蒙新高原湖区、东北平原及山地湖区、云贵高原湖区。鄱阳湖、洞庭湖、太湖、洪泽湖及巢湖是我国著名的五大淡水湖。根据“七五”期间的调查结果, 我国大部分湖泊(水库)水域尚能满足多种用水目的。但是, 到“十一五”期间, 由于受人类活动的影响, 致使藻类等水生生物过量繁殖, 溶解氧减少, 透明度下降, 湖泊水质逐渐恶化。这种人为富营养化使城市水体饮用水源、渔业养殖、旅游等相应功能下降, 特别是富营养化严重的水体引起供水障碍以及藻毒素的存在危及人畜饮水安全等。富营养化还可能引起生物资源利用的障碍, 加速湖泊的“老化”过程。

1986~1989 年我国 34 个湖泊、水库的调查表明(刘连成, 1997): 在东部地区, 所调查的湖泊大多数已进入富营养化状态(如巢湖、太湖、洪泽湖、南四湖等), 少数水库处于富营养化边缘。众多的城市湖泊已达严重富营养化, 如杭州西湖、江西九江甘棠湖、新疆石河子蘑菇湖、广州麓湖、流花湖、荔湾湖及东山湖、武汉墨水湖、昆明滇池(草海)、南京玄武湖、长春南湖等, 洞庭湖与鄱阳湖等大型淡水湖泊已具备了发生富营养化的营养盐条件。云贵高原地区的湖泊一般水滞留时间长, 水交换能力弱, 一旦入湖营养盐负荷超标, 则富营养化发展速度快, 是中国湖泊富营养化的易发区和敏感区, 如滇池、异龙湖、杞麓湖的营养状态相当高, 特别是滇池富营养化问题更为严重, 其水体已达 V 类标准, 水中的氮、磷严重超标, 汇入滇池支流的水不能达到国家地表水水质标准。因此, 滇池被国务院列入全国重点治理的湖泊之中。东北、蒙新、青藏地区的湖泊富营养状态相对较低, 一般处于中营养状态。

近 20 年来, 我国湖泊富营养化发展速度相当快。多年以来的调查结果表明, 富营养化湖泊个数占调查湖泊的比例由 20 世纪 70 年代末的 41% 发展到 80 年代后期的 61%, 至 20 世纪 90 年代后期又上升到 77%。我国湖泊富营养化的发展趋势十分严峻, 根据 2007 年中国环境状况公报, 在 26 个国控重点湖泊中, 大部分水质较差, 劣于《地面水环境质量标准》V 类标准, 氮、磷污染较高, 已经有相当一部分湖泊发生了“水华”灾害。

2007 年我国 28 个国控重点湖(库)中, 满足 II 类水质的只有 2 个, 占 7.1%; 满足 III 类水质的 6 个, 占 21.4%; IV 类的 4 个, 占 14.3%; V 类的 5 个, 占 17.9%; 劣 V 类的 11 个, 占 39.3%。主要污染指标为总氮和总磷。在监测的 26 个湖(库)中, 重度富营养的 2 个, 占 7.7%; 中度富营养的 3 个, 占 11.5%; 轻度富营养的 9 个, 占 34.6%(2007 年中国环境状况公报)。

2007 年太湖水体水质总体为劣 V 类。21 个国控监测点位中, IV 类、V 类和劣 V 类水质的点位比例分别为 23.8%、19.0% 和 57.2%。湖体处于中度富营养状态, 主要污染指标为总氮。滇池水体水质总体也为劣 V 类。巢湖水体水质总体为 V 类, 西半湖处于中度富营养状态, 东半湖处于轻度富营养状态。其他 10 个重点国控大型淡水湖泊中, 博斯腾湖、洱海的水质为 III 类, 镜泊湖、洞庭湖、鄱阳湖和兴凯湖的水质为 IV 类, 南四湖的水质为 V 类, 白洋淀、达赉湖和洪泽湖的水质为劣 V 类。与上年相比, 南四湖、洞庭湖和鄱阳湖水水质好转, 其他大型淡水湖水水质无明显变化, 主要污染指标为总氮和总磷。

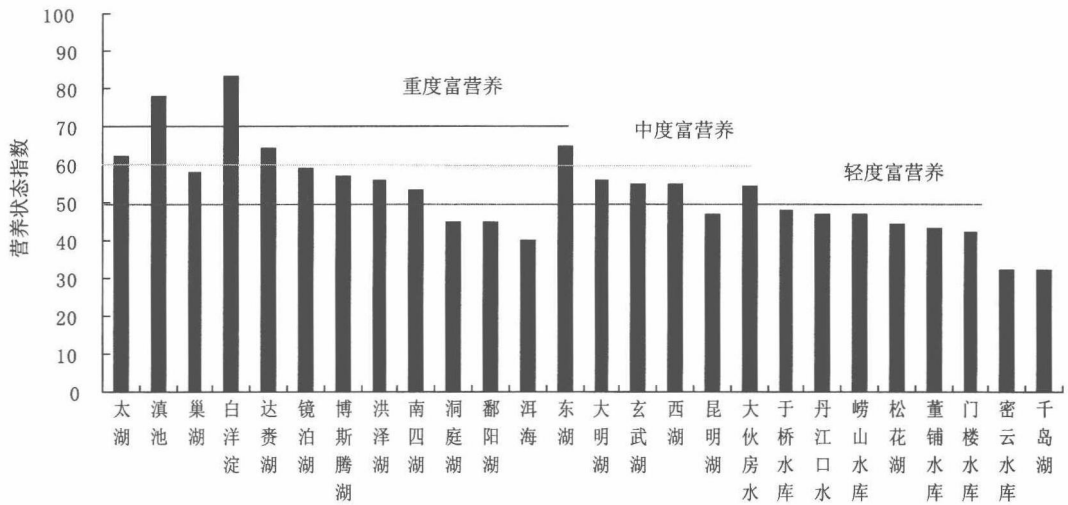


图 1.1 中国重点湖(库)营养状态指数(2007 年中国环境状况公报)

洱海、鄱阳湖和洞庭湖处于中营养状态,南四湖、洪泽湖、博斯腾湖和镜泊湖处于轻度富营养状态,达赉湖处于中度富营养状态,白洋淀处于重度富营养状态(见图 1.1、表 1.2)。

表 1.2 重点大型淡水湖泊水质状况

湖库名称	营养状态指数	营养状态	水质类别		主要污染指标
			2007 年	2006 年	
白洋淀	83	重度富营养	劣 V	劣 V	氨氮、总磷、总氮
达赉湖	64	中度富营养	劣 V	劣 V	pH、高锰酸盐指数
镜泊湖	59	轻度富营养	IV	IV	挥发酚、总磷
博斯腾湖	57	轻度富营养	III	III	—
洪泽湖	56	轻度富营养	劣 V	劣 V	总氮、总磷
南四湖	53	轻度富营养	V	劣 V	总磷、总氮、石油类
洞庭湖	45	中营养	IV	V	总磷、总氮
鄱阳湖	45	中营养	IV	V	总磷、总氮
洱海	40	中营养	III	III	—
兴凯湖	—	—	IV	II	挥发酚

城市内湖如昆明湖(北京)为 III 类,西湖(杭州)、东湖(武汉)、玄武湖(南京)、大明湖(济南)为劣 V 类。主要污染指标为总氮、总磷。昆明湖处于中营养状态,玄武湖、西湖、大明湖处于轻度富营养状态,东湖处于中度富营养状态(2007 年中国环境状况公报)。

我国水体富营养化现象在江河、湖、库等三类淡水水体中均有发生,各类水体以惊人的速度由贫营养向富营养方向发展,其中湖泊水体交换能力不及河流,营养盐输入量大,因而发生水体富营养化的现象较多。我国的湖泊水体富营养化形势严峻,主要呈现以下两个特点:其一是富营养化范围扩大,程度加剧,进程加快;其二是湖泊藻类种群演替,数量上升,水华蔓延(秦伯强等, 2002)。受围垦、水产养殖、入湖污染物负荷增加等影响,湖

泊中水生植被大量萎缩,在富营养化较严重的湖泊中,藻类已经完全替代高等植物成为优势种群,藻类数量不断上升,但是种群数减少。从藻类演替来看,当湖泊从中富营养化过渡到重富营养化的过程中,水体中的优势种从甲藻、绿藻演替为蓝藻、绿藻,而最终以蓝藻为优势种。伴随着富营养化程度的加剧,蓝藻水华现象频繁发生,其治理极其棘手,不仅要花费大量的人力、物力去进行治理,更重要的是其同时也造成宝贵水资源的大量浪费,严重制约经济、社会的可持续发展,影响工农业生产和居民生活。

三、太湖富营养化和蓝藻水华

1. 太湖概况

太湖古名“震泽”,又名“笠泽”,是我国著名五大淡水湖中第三大淡水湖,位于长江三角洲的南缘,界于北纬 $30^{\circ}55'40''\sim 31^{\circ}32'58''$ 和东经 $119^{\circ}53'32''\sim 120^{\circ}36'10''$,地跨江、浙两省,北临无锡,东连苏州,南濒湖州,西接宜兴、长兴,整个流域面积 36500 km^2 (孙顺才等, 1993)。太湖正好处于我国经济最发达的长江三角洲地区,是这一地区的重要淡水资源。长期以来,它已是上海、无锡、苏州等大、中城市的最重要的供水源地。太湖不仅是国内外享有盛名的旅游胜地,而且还是兼有航运、灌溉和渔业等多种功能的大型湖泊。太湖流域不仅是我国农业的精华所在,也是目前我国经济最发达的区域之一。

太湖面积 2338 km^2 ,太湖南北长 68.5 km ,东西平均宽 34 km ,最宽处 56 km ,其平均水深仅 1.89 m ,最大水深 2.6 m ,是一个典型的浅水湖泊。湖盆地势由东向西倾斜,深水区位于湖心略偏西,即大约在平台山以北水域。湖中岛屿和暗礁很多,最大的岛屿是洞庭西山。通常以洞庭西山为界,其西为广阔的太湖湖面,俗称西太湖;其东为东北向的湖湾,俗称东太湖(蔡启铭, 1998)。

太湖湖面开阔,水浅,风浪较大。据观测,在一般天气条件下,太湖风浪在 0.5 m 左右,当 $5\sim 6$ 级风时,波高可达 1 m ,浪大造成湖底沉积物颗粒再悬浮。研究表明,太湖水中的悬浮颗粒是一个影响其光、热乃至生态过程的重要物理因素。太湖温热条件好、光照充足,湖区年平均气温为 $15.3\sim 16^{\circ}\text{C}$,尤其是夏季 $7\sim 8$ 月,平均温度达到 $28\sim 29^{\circ}\text{C}$ 。太湖水温历年平均比气温高 1.3°C ,即水温可达 $29\sim 30^{\circ}\text{C}$,这正是蓝藻中微囊藻属繁殖生长的最适宜温度,加上太湖光照充足,年日照时数约 $2000\sim 2200$ 小时,使太湖水体的初级生产力常常很高。太湖湖底淤泥甚薄,一般在 $20\sim 30\text{ cm}$ 左右,营养物在湖底不易淤积,湖底淤泥是内源性污染的主要来源。太湖不仅浅,而且湖底平坦,平均坡度仅有 $19.7''$,因此湖流一般不大,主要是风生流,只有在某些河口附近,吞吐流比较明显。一般湖流流速在 10 cm/s 左右,在湖湾水域,湖流更小,约 5 cm/s 左右。因此,水中营养物质和浮游藻类的扩散迁移受风浪的影响较大,在风的作用下,夏季藻类往往可以上下混合或者随风漂移而在某一区域形成堆积(蔡启铭, 1998)。

太湖水源主要有三路:①南路来自苕溪水系;②西路来自南溪水系;③北路来自江南运河。其出口多分布于湖的东部和北部,主要由河墩港、胥口港、瓜径口和太浦河等港渚下泄,在经吴淞江、黄浦江、望虞河、浏河等排入长江。

2. 太湖富营养化与蓝藻水华

从 20 世纪 80 年代开始,太湖富营养化每隔 10 年上升一个等级,而水质则下降一个等级,目前全湖处于富营养到重富营养状态,水质属于劣五类(秦伯强等, 2007)。太湖富营养化的发展和治理已历经多年,特别是“十五”以来,国家投入大量人力物力治理太湖富营养化,试图恢复湖泊原有的山清水秀环境,但收效甚微。自 1998 年在太湖启动的“三省一市”零点达标排放以来,太湖富营养化不但没有得到有效控制,反而呈现出进一步加剧的趋势,从每年 5~10 月太湖湖心区水体总磷(TP)、叶绿素 a 监测平均值看,1998 年以来水体 TP 浓度仍呈不断增加的趋势,叶绿素 a 含量也不断增高(图 1.2)。

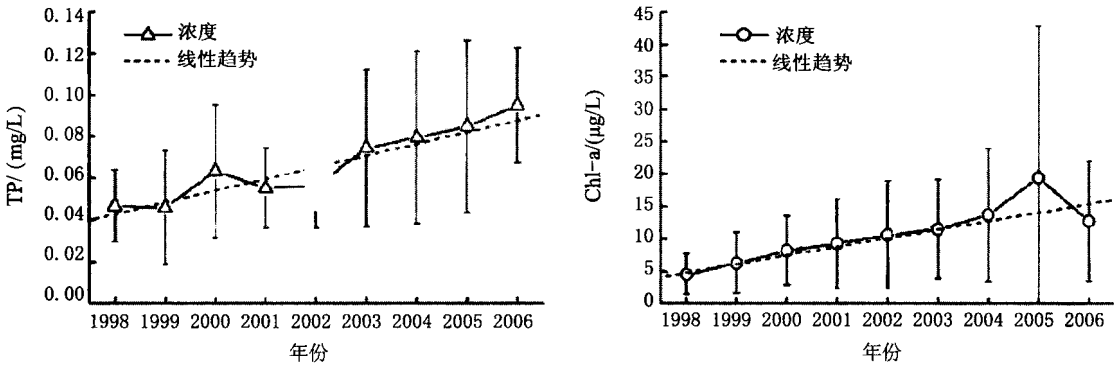


图1.2 1998~2006年太湖湖心区TP、Chl-a浓度的逐年变化和线性趋势(秦伯强等, 2007)

太湖富营养化之所以如此严重而且治理起来异常艰难,既有自然方面的因素,也有人为方面的原因。在自然因素方面,从地理位置上,我国地貌的基本特征是西高东低,呈阶梯分布,大江大河多发源于第一、二级阶梯上,而太湖地处第三级阶梯,位于长江下游三角洲的南翼坦荡的太湖平原上。由于长江的冲刷带来大量营养物质沉积于此,使得下游三角洲地区土壤较为肥沃。根据湖泊硅藻生物种群组合与湖泊营养水平的转换函数关系重建太湖近 300 年来的营养演化,结果表明,太湖在 20 世纪之前总磷浓度介于 50~60µg/L,已经处于中营养状态,这样的湖泊非常容易发生富营养化。而太湖以前没有呈现富营养化的态势,主要得益于其周边地区大量的湿地与水生植被的发育(秦伯强等, 2007)。从水文特征上,太湖是一个典型的大型浅水湖泊,位于季风气候区并受台风的影响,风速较大。中国科学院太湖湖泊生态系统研究站 2001 年全年风速风向观测资料显示,全年风速在 2~6m/s 的天数为 298 天,占全年的 82%;风速超过 6m/s 的天数有 22 天,占全年的 6%。受风浪和湖流作用使得水——沉积物界面经常处于不稳定状态,沉积物容易被扰动而发生再悬浮,大量营养物质随之释放进入水体,从而影响了水质(秦伯强等, 2007)。

在人为因素方面,人类活动对太湖水体的富营养化有重要影响。一段时期以来,一系列不合理的开发活动导致太湖生态系统遭受严重破坏。尤其解放后在湖泊实施的围垦,许多湖滨滩涂湿地遭到破坏。据统计,自 1949 年以来太湖共围垦面积 528 km²,这些被围垦的水域绝大部分位于湖滨浅水地区,水生植物茂盛;围垦后进行种植水稻或渔业养殖等,使得原来的拦截污染物的净化区转变为输出污染物的污染源,不仅水体的净化能力下

降,而且生态系统发生演替,导致太湖富营养化日趋严重。30多年来,太湖沿湖地区农业生产的迅猛发展,对地方经济发展以及全国经济振兴有重大意义。但与此同时,随着该地区社会经济的高速发展以及人口的急剧增加,导致大量的工业、农业、生活污水产生并源源不断地排入太湖,流域的水环境急剧恶化,给该地区的环境造成了巨大压力,对该地区经济持续发展和人们健康造成了很大威胁。太湖水质调查结果表明,20世纪80年代初,太湖主要为3种水质类型:轻污染水域(Ⅳ类)面积占全湖的1%,主要分布在入湖河道以及小梅口附近的局部水域;尚清洁水域(Ⅲ类)占30%,主要分布在太湖的沿岸区;较清洁水域(Ⅱ类)占69%,主要分布在湖心区。20世纪80年代末期太湖出现了重污染水域,占0.8%,主要分布在五里湖及梅梁湖区的闾江口附近,轻污染水域也上升为3.2%。20世纪90年代水质评价的结果表明,轻污染水域已占全湖面积的70%以上,重污染水域占1%,同时较清洁的水域面积仍在继续缩小(胡明等,1998)。

太湖水体中的主要污染物为氮、磷及耗氧有机物。大量氮、磷等营养物质进入太湖后,引起藻类等浮游生物旺盛增殖,从而破坏水体的生态平衡,富营养化程度不断加剧。20世纪60年代,太湖水体的营养状态大致在贫营养状态到中营养状态之间,并且偏向贫营养状态。进入80年代后,水体逐渐由中营养状态向富营养状态过渡,在80年代末已经达到中营养化标准。90年代后富营养化日趋加剧,并且速度越来越快,局部水体(如五里湖和梅梁湖)部分年份已表现为重富营养状态(张运林等,2001)。近20年来的每年夏季,太湖的某些水域都不同程度地出现大量藻类水华,特别在1990年和1998年夏季,局部水域(如竺山湖、梅梁湖、太湖西部沿岸等水域)两度发生藻类水华大量暴发,藻类总密度(监测点)最高分别达到了7.6亿个/L、4.3亿个/L。太湖水质的恶化,尤其是富营养化的加剧,生态环境发生明显改变,已影响到人民的日常生活,制约了流域的经济发展。1990年夏季,整个梅梁湖被藻类覆盖,水域约100km²水面藻密度在较高的数量水平上持续25天,局部藻细胞含量13亿个/L,自来水被迫大幅度减产,近百家工厂相继被迫减产和停产,造成直接经济损失超亿元(范成新等,1997)。2007年太湖蓝藻大暴发导致饮用水危机,由于供水量不足、水质不好,给当地居民生活造成了不利的影响。太湖富营养化和水污染日趋严重已成为国内外广泛关注且迫切需要尽快解决的环境问题。

太湖富营养化水体出现的藻类有7个门类共97个种别。20世纪80年代,以蓝藻、硅藻、绿藻为总体优势群,分别占20%、28%、40%(江耀慈等,2001)。90年代以来,蓝藻占绝对优势,最高时占总量的94%,其中又以微囊藻为主,在水华最严重的1990年8月、10月在太湖的西北湖区,微囊藻(*Microcystis*)占总生物量的69.8%,其中铜绿微囊藻(*M. aeruginosa*)和水华微囊藻(*M. flos-aquae*)为形成水华的主体;螺旋鱼腥藻、水华鱼腥藻(*Anabeana spiroides* Kleb. *A. flos-aquae* Breb)和湖沼色球藻(*Chroococcus limneticus* Lemm)为亚优势种类,占总生物量的9.6%和5.8%,也是构成水华的成分(杨清心,1996)。近几年来,除了微囊藻外,太湖水体藻类出现了平裂藻(*Merismopedia*)、微小胶鞘藻(*Phormidium*),并占有一定的百分比,但总的来说,微囊藻仍然占优势。2007年太湖发生大面积蓝藻水华,2008年和2009年又相继形成湖泛,严重破坏了太湖水生态系统,并对社会生产和人民生活产生严重不利的影响,因此,当地政府采取各种措施进行产业升级、污染控制和生态修复,同时也成立蓝藻打捞队,进行蓝藻清除,有效减缓了太湖水质恶化的趋势,局部水质得到改善。

第二节 湖泊水华蓝藻

蓝藻或蓝绿藻是一类含有叶绿素 a,能进行放氧性光合作用的原核生物,现在常常被称为蓝细菌(Cyanobacteria)。蓝藻有极强的适应性,广泛分布于地球上各种类型的水环境和一些陆生环境中,大部分分布在淡水中,成为淡水中重要的浮游植物,在温暖的季节里常大量繁殖形成水华。部分分布于海洋、内陆盐水、湿地、土壤中或岩石、树木上,也有与其他生物共生或者内生,少数种类能生活在高温温泉或者终年积雪的极地,但在温暖和有机物含量较高的水体中较多。蓝藻是地球上比较原始的原核生物,是海洋和湖泊水体中最为重要的初级生产者。

一、蓝藻生物学特征

1. 形态和结构

蓝藻形态结构比较简单,细胞壁缺乏纤维素,含有黏质缩氨酸,这是蓝藻区别于其他藻类的特征之一;许多蓝藻能向细胞外分泌类似细菌荚膜样的胶黏物质,壁外常形成外膜或胶质鞘,使细胞群或丝状体结合在一起;衣鞘在有些种类很稠密,有相当的厚度,有明显的层理,有的种类则没有层理,含水程度极高,以致不易观察到;相邻细胞的衣鞘可相融合,衣鞘中有时具棕、红、灰等非光合作用色素;蓝藻无真正的细胞核,细胞中央含有核物质,无核膜和核仁,但具有核的功能,故称其为原核;细胞内除含有叶绿素和类胡萝卜素外,大多数蓝藻藻体内含有的藻蓝蛋白和别藻蓝蛋白,从而使之呈现蓝绿色;部分种属含有藻红素故呈红色或橙色。

蓝藻多集聚生长,群体形态和大小相差很大。藻体有单细胞体、群体和丝状体,营养细胞和生殖细胞都不具鞭毛,不产游动细胞;球状或杆状单细胞可连成丝状或集成一团。丝状藻类的形态有线形、螺旋形、链形,有的甚至具有二级形态结构;其大小可以是很小的单丝藻,也可以聚集成肉眼可见的大群体;群体蓝藻可以是几个微米的单细胞到几个毫米的球形群体,群体的微囊藻是蓝藻水华发生的主要藻类。

2. 生殖方式

蓝藻没有有性生殖,也没有具鞭毛的生殖细胞。蓝藻的繁殖方式有两类:一为营养繁殖,包括细胞直接分裂(即裂殖)、群体破裂和丝状体产生藻殖段等几种方法;另一种为某些蓝藻可产生厚壁孢子(akinetes)、异形胞(heterocysts)、内生孢子(endospore)和外生孢子(exospore)等,以进行无性生殖。

细胞分裂:非丝状体种类的生殖方式是细胞分裂,有二分裂和多重分裂。分裂的细胞留在一胶质衣鞘内,形成群体,群体的增殖是在群体达到一定限度后,受外力而碎裂。丝状种类的增殖则靠藻丝的断裂繁殖。连成丝状的蓝藻其细胞链断裂而形成的片段,称为链丝段,具有繁殖功能。

藻殖段：蓝藻藻丝上两个营养细胞间生出的胶质隔片(凹面体)或由间生异形胞断开后形成的若干短的藻丝分段。

厚壁孢子：厚壁孢子系由普通营养细胞增大体积，积累丰富营养，然后细胞壁增厚而成。厚壁孢子大多出现于丝状体类型的种类上，它的有无，以及形状、数目、位置等，均为分类的依据。厚壁孢子有极强的生命活力，能在不利环境条件下长期休眠，当环境好转时孢子萌发成新的丝状体，从而能抵抗不良环境。

异形胞：异形胞是丝状蓝藻类(除了颤藻目以外)产生的一种与繁殖有关的特别类型的细胞，它是由营养细胞特化而成的。形状与一般细胞不同，圆形色淡，成熟的异形胞是透明的，其细胞壁在与相邻细胞相接处有钮状增厚部(极节球)。异形胞着生在藻丝上的位置有顶端位或胞间位或与厚壁孢子直接相邻，常作为分类的依据之一。异形胞一般认为是无生殖功能的孢子或孢子囊，其次级功能在于有些种类藻体经常在异形胞的地方断裂。异形胞为固氮场所，可在外界环境有氧气的情况下保持固氮酶的活性。具有异形胞的蓝藻能固氮，当水中氮缺乏时，异形胞的数目显著增加。

内生孢子、外生孢子：只在管藻目和其他目的少数属中发生，不普遍。

3. 伪空泡

伪空泡是一种惰性、中空、充满气体的两端为锥形的圆柱形结构，仅由蛋白质组成。形成水华的蓝藻种类通常具有伪空泡，伪空泡是一些蓝藻细胞内具有的气泡，在光学显微镜下呈黑色、红色或者紫色。伪空泡可使细胞浮在上层水内并保证细胞的浮力，调节细胞距离水面的深浅，以利于吸收适当的光线进行光合作用。合成自身的营养物质，同时放出氧气。

伪空泡在细胞质内并不是随意分布的，而是按六边形交错堆积而成，这样伪空泡占有较小的体积而可以提供较大的浮力(唐忠波，2008)。蓝藻的浮力调节机制是其在富营养化湖泊中占据优势的主要因素之一。蓝藻的浮力调节机制包括三部分：伪空泡的合成、伪空泡的破裂和细胞镇重物的合成与消耗，其中细胞镇重物主要是指细胞内碳水化合物和蛋白质。蓝藻浮力调节能力是依靠细胞密度的变化来达到的。细胞密度的变化决定于细胞内伪空泡和镇重物的含量，两者分别为细胞提供上浮和下沉的动力。

4. 光合作用

蓝藻是地球上最早以水和二氧化碳为原料进行光合作用，合成有机物并释放氧气的生物，其光合系统的放氧功能与高等植物相同，但是具有与高等植物完全不同的光合天线系统——藻胆素。在低等蓝藻的有氧光合作用的光反应中，可见光中的红光和蓝光由环状四吡咯化合物——叶绿素吸收，绿光、黄光和橙光等主要由线性四吡咯化合物——藻胆色素吸收。藻胆色素对光的吸收离不开与它共价结合的藻胆蛋白的作用。藻胆蛋白是存在于蓝藻和红藻中的一类集光辅助蛋白，它可以调节藻胆色素的构象、定向以及它们的吸收光谱。