

李效宇 编著

微囊藻毒素及其 毒理学研究



科学出版社

www.sciencep.com

河南省高等学校杰出科研人才创新工程项目 (2006KYCX021)

河南师范大学学术著作出版基金重点资助

微囊藻毒素及其毒理学研究

李效宇 编著

科学出版社

北 京

Supported by the Henan Innovation Project for University
Prominent Research Talents (2006KYCX021) and the
Research Book Fund of Henan Normal University

Study on the Toxicology of Microcystins

by
Li Xiaoyu

Science Press
Beijing

内 容 简 介

本书主要根据作者及其研究组近 10 年来的研究成果,同时参考国内外有关的研究资料和文献编写而成。全书共分 10 章,内容包括蓝藻水华和蓝藻毒素、微囊藻毒素的检测、微囊藻毒素的毒性及其毒理学研究、微囊藻毒素的生物富集与水体食物链、微囊藻毒素与人类健康、微囊藻毒素的去除方法、微囊藻毒素的毒理学研究方法等。另外,本书还简要介绍了淡水水体中微囊藻毒素的管理策略和方法、蓝藻水华的生态学研究方法。

全书比较系统和全面地介绍了微囊藻毒素近年来的研究成果、进展以及未来的研究方向和重点。本书内容翔实、新颖,语句流畅,而且多数专业词汇都附有相应的英文词汇,便于读者查阅。

本书主要适合从事水生生物学和毒理学研究的科研人员、淡水水资源和水环境保护的科研和管理人员、高等学校水生生物学和生态毒理学专业的研究生和高年级本科生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

微囊藻毒素及其毒理学研究/李效宇编著. —北京:科学出版社, 2007

ISBN 978-7-03-017863-3

I. 微… II. 李… III. 藻类-毒素-研究 IV. R996. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 096714 号

责任编辑:韩学哲 李久进 沈晓晶/责任校对:钟 洋

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 4 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2007 年 4 月第一次印刷 印张: 8 3/4 插页: 1

印数: 1—1 500 字数: 165 000

定价: 35.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

前言

近年来,由于水体的富营养化而导致蓝藻水华的频繁发生,这已成为国内外普遍关注的环境问题。蓝藻水华不仅降低水质、破坏水环境景观、造成水体的二次污染,而且部分水华还能产生蓝藻毒素而危害人类的健康。在世界各国所发生的蓝藻水华中,微囊藻水华是发生最频繁、危害最大的一类,而且很多微囊藻水华有毒,因为它们能产生具有生物毒性的微囊藻毒素。该毒素是一类环状七肽肝毒素,经常存在于发生蓝藻水华的河流、湖泊、水库和池塘等水体中。有关野生动物、鱼类和家畜家禽直接接触或饮用含有该毒素的水而引起中毒甚至死亡的报道很多。

微囊藻毒素对人类的健康也有危害。人们接触含有毒素的水华,如在湖泊、水库中进行游泳、水上运动等娱乐活动,会引起皮肤和眼睛过敏,发烧,疲劳以及急性肠胃炎。毒理学研究结果发现,毒素作用的靶器官是动物肝脏,它导致动物中毒、死亡的主要原因是由于动物肝脏受到损伤。微囊藻毒素对人类健康的危害备受关注,世界卫生组织已经推荐了饮用水微囊藻毒素限量标准以及人群最大可耐受日摄入量。关于微囊藻毒素及其环境行为受到科学家、水环境保护部门以及大众的关注,科学家们已经发表了许多有关的研究论文并获得了研究成果,但目前国内尚无一本专门关于微囊藻毒素及其生态毒理学研究的论著。

本书主要根据作者及其研究组近 10 年来的研究成果,同时参考国内外有关研究资料和文献编写而成。试图较全面而系统地介绍微囊藻毒素及其毒理学研究历史、现状和进展,以期为同行研究者提供一些参考和帮助。全书共分 10 章,内容主要包括蓝藻水华和蓝藻毒素、微囊藻毒素的检测、微囊藻毒素的毒性及其毒理学研究、微囊藻毒素的生物富集与水体食物链、微囊藻毒素与人类健康、微囊藻毒素的去除方法、微囊藻毒素的毒理学研究方法等。另外,本书还简要介绍了淡水水体中微囊藻毒素的管理策略和方法、蓝藻水华的生态学研究方法。

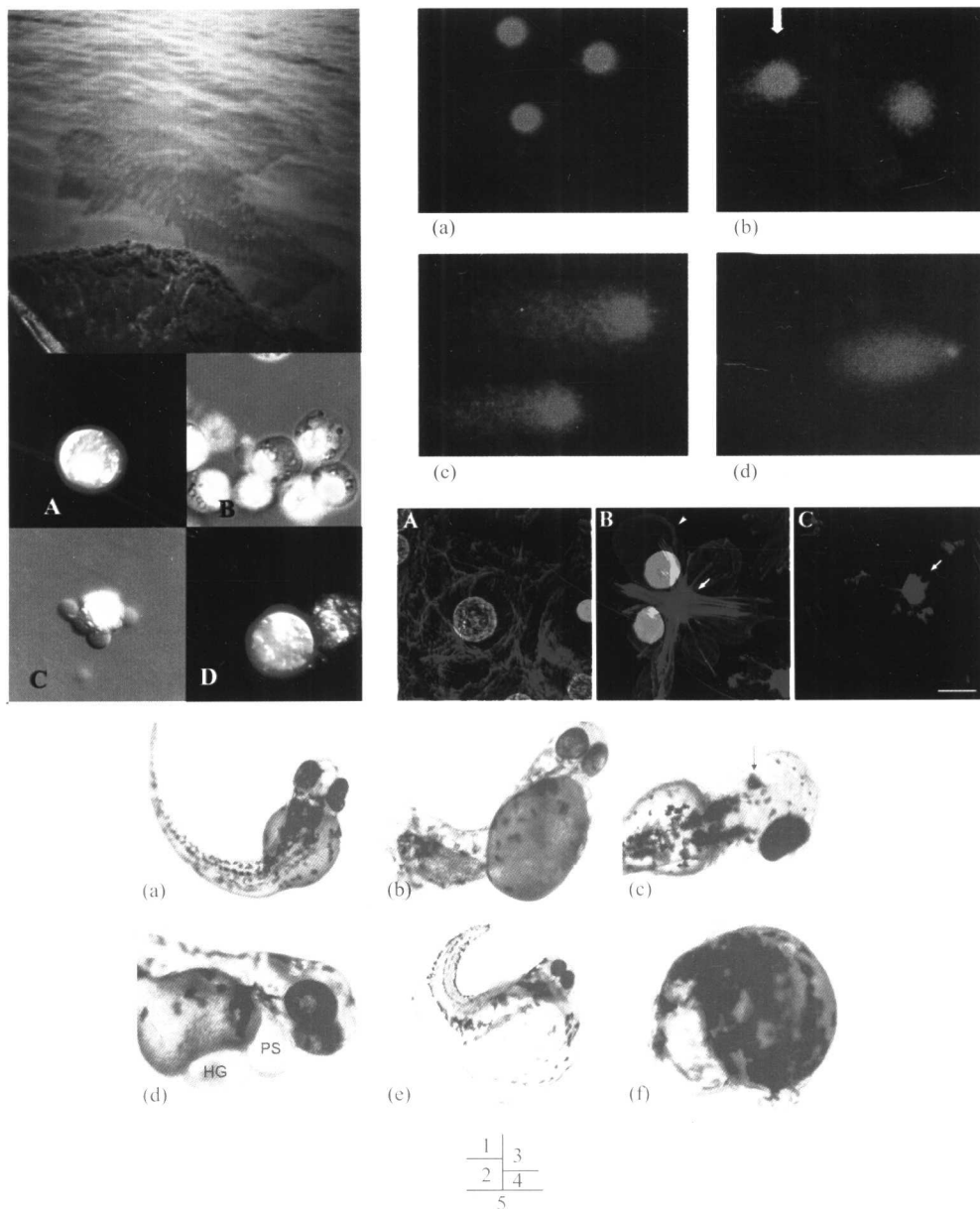
作者首先要感谢中国科学院水生生物研究所刘永定教授多年来的支持与帮助。同时,在编写本书的过程中,还得到了作者所在单位领导和同事的关怀和支持。另外,本书还得到河南省高等学校杰出科研人才创新工程项目(2006KYCX021)的资助。作者在此一并表示衷心的感谢!

毒理学是一门交叉学科,因此,本书所涉及的内容较广泛并力求准确和完整,但限于作者的知识水平和研究阅历,书中难免存在一些不足甚至错误,敬请各位读者批评指正。

李效宇

2006 年 6 月 19 日

• i •



1. 滇池蓝藻水华

2. MC 引起鲤鱼肝细胞形态改变 (Li *et al.* 2001)

(A. 对照; B. 细胞核浓缩; C. 细胞膜发泡; D. 坏死肝细胞)

3. MC 引起 DNA 损伤的彗星电泳图谱 (Mankiewicz *et al.* 2002)

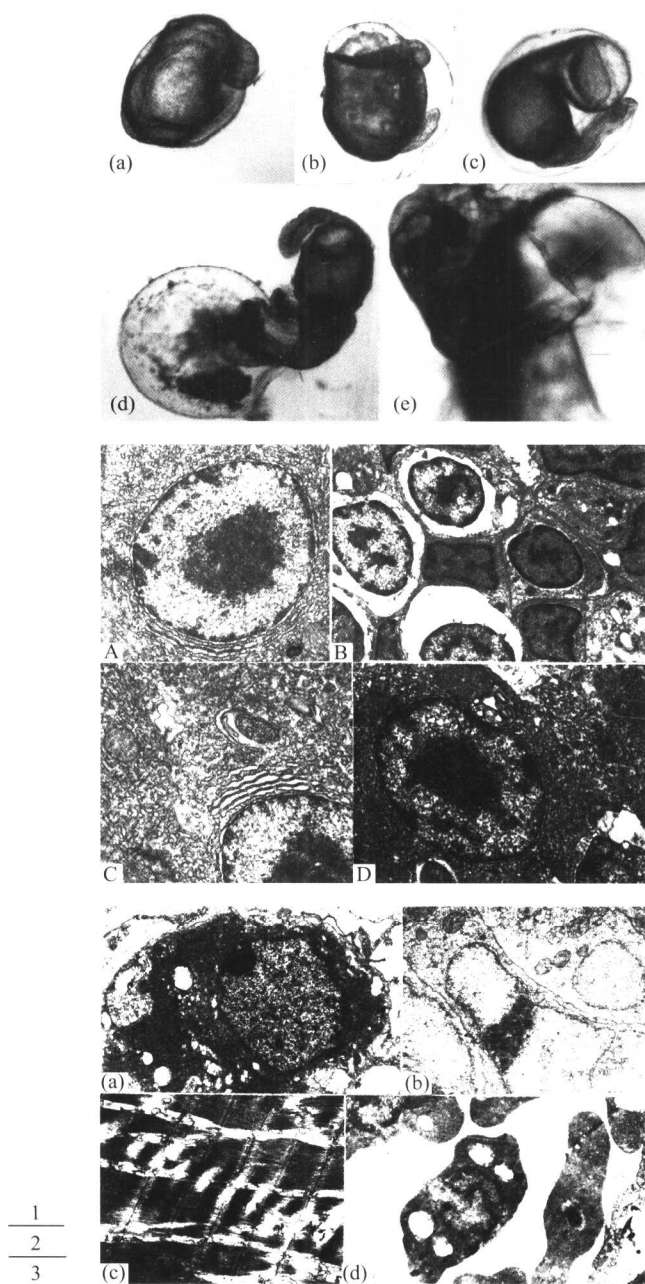
[(a) 对照; (b)~(d) 处理组]

4. MC 引起细胞骨架损伤 (Batista *et al.* 2003)

(A. 对照; B. 细胞骨架损伤; C. 细胞骨架崩解)

5. MC 对斑马鱼的胚胎毒性 (Wang *et al.* 2004)

[(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f) 各种畸形胚胎]



1. 微囊藻毒素对泥鳅胚胎的致畸作用 (Liu *et al.* 2002)

[(a)、(b)、(c) 畸形胚胎; (d) 异常孵化; (e) 管状心脏]

2. 微囊藻毒素对泥鳅肝细胞的损伤 (Liu *et al.* 2002)

(A. 对照肝细胞; B. 处理, 示细胞联结疏松; C、D. 处理, 示内质网膨胀)

3. 微囊藻毒素对泥鳅肝细胞、心肌细胞和红血细胞的损伤(Liu *et al.* 2002)

[(a) 处理组肝细胞核; (b) 处理肝细胞的线粒体; (c) 处理组心肌细胞; (d) 处理组红血细胞]

目 录

前言

第一章 水体的富营养化和蓝藻水华	1
一、蓝藻	1
二、水体的富营养化和蓝藻水华污染	5
三、蓝藻毒素	10
主要参考文献	14
第二章 微囊藻毒素概述	15
一、微囊藻毒素的结构和理化特性	15
二、微囊藻毒素的产生	20
主要参考文献	22
第三章 微囊藻毒素的检测	24
一、生物学方法	24
二、化学检测方法	25
三、生物化学方法	27
主要参考文献	29
第四章 微囊藻毒素的毒性及其毒理学研究	31
一、微囊藻毒素的毒性特点	31
二、微囊藻毒素的胚胎发育毒性	37
三、微囊藻毒素的免疫毒性	39
四、微囊藻毒素的遗传毒性	39
五、微囊藻毒素与氧化应激	40
六、微囊藻毒素的细胞毒性与细胞凋亡	41
七、微囊藻毒素的毒性机制及其研究进展	46
主要参考文献	50
第五章 微囊藻毒素的生物富集与水体食物链	58
一、微囊藻毒素在水生植物中的生物富集	58
二、微囊藻毒素在水生动物中的生物富集	58
三、微囊藻毒素在陆生动物中的生物富集	62
四、微囊藻毒素与水体食物链	63
主要参考文献	65

第六章 微囊藻毒素与人类健康	69
一、微囊藻毒素对人类健康危害的途径	69
二、微囊藻毒素对人类健康的主要危害	70
三、微囊藻毒素的安全标准	71
四、微囊藻毒素中毒的解毒方法和药物	73
主要参考文献	73
第七章 微囊藻毒素的去除方法	76
一、物理学方法	76
二、化学方法	77
三、生物学方法	78
四、饮用水中微囊藻毒素的去除方法	79
主要参考文献	81
第八章 蓝藻水华和微囊藻毒素的管理	84
一、蓝藻水华的预警和管理方法	84
二、水体中微囊藻毒素的管理策略	88
主要参考文献	88
第九章 蓝藻水华的生态学研究方法	89
一、蓝藻及其水华的野外实验方法	89
二、蓝藻水华种类鉴定及其生物量的测定	90
三、微囊藻的培养	93
主要参考文献	94
第十章 微囊藻毒素的毒理学研究方法	96
一、急性毒性实验方法	96
二、慢性毒性实验方法	99
三、细胞毒理学的研究方法	101
四、细胞凋亡的研究方法	104
五、免疫毒性检测方法	113
六、遗传毒性检测方法	114
七、发育毒性的检测方法	115
主要参考文献	118
附录	120
I. 本书所用缩略语	120
II. 英文(拉丁文)中文名词对照	124
图版	

第一章 水体的富营养化和蓝藻水华

一、蓝 藻

蓝藻 (blue-green algae), 又名蓝细菌 (cyanobacterium), 是一类古老而原始的生物类群, 也是地球上最早出现的光合自养原核生物。它们一般形体微小, 只能借助于显微镜才能观察; 其结构简单, 整个生物体没有根、茎、叶的分化, 通体似叶并能进行光合作用, 故又称叶状体植物 (胡鸿钧等 1980)。

蓝藻广泛分布于淡水、海水和半咸水等水体中, 淡水蓝藻的很多种类为浮游性, 喜有机质丰富的碱性水体, 多在春、夏两季繁盛。作为一类古老的生物类群, 蓝藻在长期的生物进化过程中发展了一系列独特的形态特点和生理代谢机制, 使其能够在各种不同生境中生长、繁殖和扩布, 因而成为目前地球上分布极广的一类低等生物 (张宪孔等 2001)。

有些蓝藻可以作为鱼类饵料 (如螺旋藻、鱼腥藻等) 或人类食物 (如念珠藻、螺旋藻), 还有些种类具有固氮能力, 能为水稻等农作物提供氮源。而另一方面, 水体中蓝藻的大量生长和繁殖会带来严重的水环境问题, 该问题在近年来越发突出而受到广泛关注。因为在环境条件适宜时, 蓝藻能够快速生长、繁殖, 并在较短时期内成为优势种群。当蓝藻生长达到一定生物量时, 它们便在水体表层大量聚集, 形成肉眼可见的蓝藻聚集体并使水体呈现出明显的蓝绿色, 即蓝藻水华 (cyanobacterial bloom)。常见的水华蓝藻是微囊藻属 (*Microcystis*)、鱼腥藻属 (*Anabaena*)、束丝藻属 (*Aphanizomenon*)、节球藻属 (*Nodularia*)、筒胞藻属 (*Cylindrospermopsis*)、颤藻属 (*Oscillatoria*)、念珠藻属 (*Nostoc*) 和螺旋藻属 (*Spirulina*) 等 (宋立荣等 2001; 李效宇等 1999)。

当前世界上淡水水体发生蓝藻水华的频率和程度呈现出逐渐增长的趋势, 而且几乎每个国家都在不同程度上遭受了蓝藻水华的影响或困扰, 其中有一些水华具有生物毒性 (Chorus *et al.* 1999) (表 1-1)。

蓝藻水华不仅严重降低水体利用价值, 而且很多蓝藻能产生蓝藻毒素 (cyanotoxin) 而对人类健康构成威胁。已经报道的有毒蓝藻 (toxic cyanobacterium) 主要有微囊藻、鱼腥藻、束丝藻、节球藻、筒胞藻、颤藻等种属 (Chorus *et al.* 1999) (表 1-2)。

微囊藻是国内外淡水河流、湖泊、池塘和水库等水体中发生最普遍、最频繁、危害最大的一类水华蓝藻, 在我国的分布也很广。在国内, 不少作为城市居

表 1-1 国际上有毒蓝藻水华出现的频率 (Chorus *et al.*, 1999)

国 家	被测样 品数	有毒种类 频率/%	毒 性	报 道 者
澳大利亚	231	42	肝毒、神经毒性	Baker <i>et al.</i> , 1994
澳大利亚	31	84	神经毒性	Negri <i>et al.</i> , 1997
巴西	16	75	肝毒性	Costa <i>et al.</i> , 1994
加拿大	24	66	肝毒性、神经毒性	Gorham, 1962
加拿大	39	95	肝毒性	Kotak <i>et al.</i> , 1993
加拿大	226	74	肝毒性	Kotak <i>et al.</i> , 1995
加拿大	50	10	肝毒性、神经毒性	Hammer, 1968
中国	26	73	肝毒性	Carmichael, 1988
捷克	63	82	肝毒性	Marsalek <i>et al.</i> , 1996
丹麦	296	82	肝毒性、神经毒性	Henriksen <i>et al.</i> , 1996
德国	10	70	肝毒性	Henning <i>et al.</i> , 1981
德国	533	72	肝毒性	Fastner, 1998
德国	393	22	神经毒性	Bumke-Vogt, 1998
希腊	18	?	肝毒性	Lanaras <i>et al.</i> , 1989
法国	22	73	肝毒性	Vezie <i>et al.</i> , 1997
芬兰	215	44	肝毒性、神经毒性	Sivonen, 1990
匈牙利	50	66	肝毒性	Torokne, 1991
日本	23	39	肝毒性	Watanabe <i>et al.</i> , 1980
荷兰	10	90	肝毒性	Leeuwangh <i>et al.</i> , 1983
挪威	64	92	肝毒性、神经毒性	Skulberg <i>et al.</i> , 1994
葡萄牙	30	60	肝毒性	Vasconcelos, 1994
斯堪的纳维亚	81	60	肝毒性	Berg <i>et al.</i> , 1986
瑞典	331	47	肝毒性、神经毒性	Willen <i>et al.</i> , 1997
英国	50	48	肝毒性	Codd <i>et al.</i> , 1996
美国	92	53	未确定的神经毒性	Olson, 1960
美国	102	25	肝毒性、神经毒性	Repavich <i>et al.</i> , 1990

民的饮用水源、旅游景观或养殖水体的湖泊,如东湖、巢湖、太湖、滇池等都有过蓝藻水华发生,滇池蓝藻水华有时一年可长达7~8个月(图版 I-1),而且很多蓝藻水华有毒(宋立荣等 2001; de Figueiredo *et al.* 2004)(表 1-3),给人们的生活和健康带来极大影响和危害。另外,国内大多数养殖型水体,如水库、池塘等,微囊藻水华也经常暴发,极难控制,常常导致死鱼事件,造成严重的经济损失。水华微囊藻的常见种类主要有铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*)、

绿色微囊藻 (*M. viridis*)、惠氏微囊藻 (*M. wesenbergii*)、水华微囊藻 (*M. flosaquae*)、害鱼微囊藻 (*M. ichthyoblabe*) 等, 其中以铜绿微囊藻最为常见。我国淡水水体常见的有 3 种, 即铜绿微囊藻、绿色微囊藻和惠氏微囊藻 (图 1-1), 以铜绿微囊藻为主。

表 1-2 世界上报道的有毒蓝藻及其地理分布 (Chorus *et al.*, 1999)

蓝藻种类	产生的毒素	地 域	报 道 者
水华鱼腥藻 (<i>Anabaena flosaquae</i>)	微囊藻毒素	加拿大	Krishnamurthy <i>et al.</i> , 1989 Harada <i>et al.</i> , 1991
鱼腥藻 (<i>Anabaena</i> spp.)	微囊藻毒素	丹麦	Henriksen <i>et al.</i> , 1996
鱼腥藻 (<i>Anabaena</i> spp.)	微囊藻毒素	埃及	Yanni <i>et al.</i> , 1997
鱼腥藻 (<i>Anabaena</i> spp.)	微囊藻毒素	芬兰	Sivonen <i>et al.</i> , 1990, 1992
卷曲鱼腥藻 (<i>A. circinalis</i>)	微囊藻毒素	法国	Vezie <i>et al.</i> , 1998
水华鱼腥藻 (<i>A. flosaquae</i>)	微囊藻毒素	挪威	Sivonen <i>et al.</i> , 1992
铜绿微囊藻 (<i>Microcystis aeruginosa</i>)	微囊藻毒素	世界多国	
绿色微囊藻 (<i>M. viridis</i>)	微囊藻毒素	日本	Kusumi <i>et al.</i> , 1987 Watanabe <i>et al.</i> , 1986
葡萄微囊藻 (<i>M. botrys</i>)	微囊藻毒素	丹麦	Henriksen <i>et al.</i> , 1996
阿氏颤藻 (<i>Oscillatoria agardhii</i>)	微囊藻毒素	中国	Ueno <i>et al.</i> , 1996
阿氏颤藻 (<i>O. agardhii</i>)	微囊藻毒素	芬兰	Sivonen <i>et al.</i> , 1990 Luukkainen <i>et al.</i> , 1993
阿氏颤藻 (<i>O. agardhii</i>)	微囊藻毒素	挪威	Krishnamurthy <i>et al.</i> , 1989 Meriluoto <i>et al.</i> , 1989
阿氏颤藻 (<i>O. agardhii</i>)	微囊藻毒素	丹麦	Henriksen <i>et al.</i> , 1996
颤藻 (<i>O. mougeotii</i>)	微囊藻毒素	丹麦	Henriksen <i>et al.</i> , 1996
泥生颤藻 (<i>O. limosa</i>)	微囊藻毒素	瑞士	Mez <i>et al.</i> , 1996
念珠藻 (<i>Nostoc</i> sp.)	微囊藻毒素	芬兰	Sivonen <i>et al.</i> , 1990
念珠藻 (<i>Nostoc</i> sp.)	微囊藻毒素	英国	Beattie <i>et al.</i> , 1998
米氏项圈藻 (<i>Anabaenopsis millerii</i>)	微囊藻毒素	希腊	Lanaras <i>et al.</i> , 1994

续表

蓝藻种类	产生的毒素	地 域	报 道 者
泡沫节球藻 (<i>Nodularia spumigena</i>)	节球藻毒素	澳大利亚	Baker <i>et al.</i> , 1994 Jones <i>et al.</i> , 1992
泡沫节球藻 (<i>N. spumigena</i>)	节球藻毒素	新西兰	Carmichael <i>et al.</i> , 1988 Rinehart <i>et al.</i> , 1998
束丝藻 (<i>Aphanizomenon ovalisporum</i>)	筒胞藻毒素	以色列	Banker <i>et al.</i> , 1997
筒胞藻 (<i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>)	筒胞藻毒素	澳大利亚	Hawkins <i>et al.</i> , 1985, 1997
筒胞藻 (<i>C. raciborskii</i>)	筒胞藻毒素	匈牙利	Torokne, 1997
<i>Umezakia natans</i>	筒胞藻毒素	日本	Harada <i>et al.</i> , 1994
水华鱼腥藻 (<i>A. flosaquae</i>)	鱼腥藻毒素	加拿大	Carmichael <i>et al.</i> , 1975 Devlin <i>et al.</i> , 1977
鱼腥藻(<i>Anabaena</i> spp.)	鱼腥藻毒素	芬兰	Sivonen <i>et al.</i> , 1989
鱼腥藻(<i>Anabaena</i> spp.)	鱼腥藻毒素	德国	Bumke-Vogt, 1998
鱼腥藻(<i>Anabaena</i> spp.)	鱼腥藻毒素	爱尔兰	James <i>et al.</i> , 1997
鱼腥藻(<i>Anabaena</i> spp.)	鱼腥藻毒素	日本	Park <i>et al.</i> , 1993
鱼腥藻(<i>Anabaena</i> spp.)	鱼腥藻毒素	意大利	Bruno <i>et al.</i> , 1994
束丝藻(<i>Aphanizomenon</i> sp.)	鱼腥藻毒素	芬兰	Sivonen <i>et al.</i> , 1989
束丝藻(<i>Aphanizomenon</i> sp.)	鱼腥藻毒素	德国	Bumke-Vogt, 1998
筒胞藻(<i>Cylindrospermopsis</i> sp.)	鱼腥藻毒素	芬兰	Sivonen <i>et al.</i> , 1989
微囊藻(<i>Microcystis</i> sp.)	鱼腥藻毒素	日本	Park <i>et al.</i> , 1993
颤藻(<i>Oscillatoria</i> sp.)	鱼腥藻毒素	苏格兰	Edward <i>et al.</i> , 1992
颤藻(<i>Oscillatoria</i> sp.)	鱼腥藻毒素	爱尔兰	James <i>et al.</i> , 1997
颤藻(<i>Oscillatoria</i> sp.)	鱼腥藻毒素	芬兰	Sivonen <i>et al.</i> , 1989
颤藻(<i>Oscillatoria</i> sp.)	鱼腥藻毒素	挪威	Skulberg <i>et al.</i> , 1992
水华鱼腥藻(<i>A. flosaquae</i>)	鱼腥藻毒素	加拿大	Matsunaga <i>et al.</i> , 1989
累氏鱼腥藻 (<i>A. lemermannii</i>)	鱼腥藻毒素	丹麦	Henriksen <i>et al.</i> , 1997
卷曲鱼腥藻 (<i>A. circinalis</i>)	石房蛤毒素	澳大利亚	Humpage <i>et al.</i> , 1994 Negri <i>et al.</i> , 1995, 1997
水华束丝藻 (<i>A. flosaquae</i>)	石房蛤毒素	美国	Jackim <i>et al.</i> , 1968 Ikawa <i>et al.</i> , 1982
筒胞藻 (<i>C. raciborskii</i>)	石房蛤毒素	巴西	Lagos <i>et al.</i> , 1997
林氏藻(<i>Lyngbya wollei</i>)	石房蛤毒素	美国	Carmichael <i>et al.</i> , 1997 Onodera <i>et al.</i> , 1997

表 1-3 报道有毒微囊藻的国家 (de Figueiredo *et al.* 2004)

国家(地区)	报道者	国家(地区)	报道者
欧 洲		加拿大	Gupta <i>et al.</i> , 2001
葡萄牙	Vasconcelos <i>et al.</i> , 1996	巴西	Pouria <i>et al.</i> , 1998
德国	Hummert <i>et al.</i> , 2001	大洋洲	
法国	Vezie <i>et al.</i> , 1998	澳大利亚	Atkins <i>et al.</i> , 2001
瑞士	Mez <i>et al.</i> , 1997	亚洲	
捷克	Marsalek <i>et al.</i> , 2001	中国	俞家禄等, 1987
苏格兰	Codd <i>et al.</i> , 1995	中国台湾	Lee <i>et al.</i> , 1998
斯洛文尼亚	Sedmak <i>et al.</i> , 1997	日本	Tsuji <i>et al.</i> , 1996
英国	Dow <i>et al.</i> , 2000	韩国	Lee <i>et al.</i> , 2000
挪威	Utkilen <i>et al.</i> , 2001	菲律宾	Civin-Aralar <i>et al.</i> , 2002
瑞典	Willen <i>et al.</i> , 2000	非洲	
丹麦	Henriksen, 2001	埃及	Brittain <i>et al.</i> , 2000
美洲		南非	Van Halderen <i>et al.</i> , 1995
美国	Puschner <i>et al.</i> , 1998	摩洛哥	Oudra <i>et al.</i> , 2002

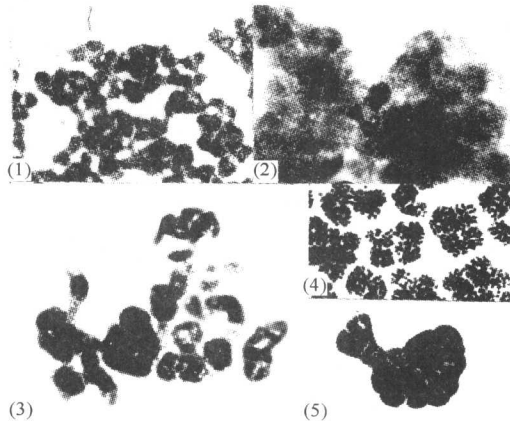


图 1-1 中国常见的微囊藻

(1) ~ (2) 铜绿微囊藻, (3)、(5) 惠氏微囊藻, (4) 绿色微囊藻

二、水体的富营养化和蓝藻水华污染

(一) 富营养化

富营养化 (eutrophication) 一词原用于描述植物营养物浓度增加对水生生态系统的生物学效应, 后来人们将其用于湖泊营养分型和演变研究, 并提出了贫营养 (oligotrophic) 和富营养 (eutrophic) 湖泊的概念, 同时还提出湖泊由贫营养

型逐步演变为富营养型的模式。到 20 世纪中后期，当富营养化及其对水环境的影响成为人们关注的问题时，通常是指人为富营养化（artificial 或 cultural eutrophication），即由于社会城市化、工农业发展及其废弃物排放等引起的水体污染。目前一般认为水体富营养化是指湖泊、水库和河流等水体中接纳过多的氮、磷等营养物质，引起水体生态结构和功能发生严重改变，并导致整个水体生态平衡破坏而造成危害的一种水体污染现象（沈韞芬等 1999）。

水体富营养化的根本原因是营养物质增加，主要是氮、磷，可能还有碳、微量元素或维生素等。营养物质主要来源于农业（水土流失和农业施肥等）、工业（工业废水和污水）、城镇人口（生活污水）、大气降水（雨水中的氮和磷）、渔业和畜牧业等。这些来源可以是天然的，也可以是人为的，而且人为污染更突出。如工业废水和城市生活污水等，这种污染称为点源污染，其余来源称为非点源污染，如水土流失、农业施肥、降水等。

水体富营养化已经成为当今全球性的水域环境污染问题。欧洲、非洲、北美洲和南美洲分别有 53 %、28 %、48 % 和 41 % 的湖泊存在不同程度富营养化，而亚太地区 50 % 以上湖泊富营养化，我国 60 % 以上湖泊处于富营养化状态，比较突出的有云南滇池、江苏太湖和安徽巢湖等。另外，长江中下游很多湖泊和水库也都有不同程度的富营养化存在。水体富营养化的危害日益突出，给经济和社会发展、环境保护和人们健康带来越来越大的威胁和危害，其中，主要表现在对饮用水及其水源质量的影响、对旅游景观的破坏和对渔业的影响等。因此，控制水体富营养化已经成为当今世界各国关注和重视的水环境问题。

(二) 蓝藻水华

1. 蓝藻水华发生的原因

水体富营养化的后果和直接表现就是发生蓝藻水华。不同国家和学者对水体富营养化水平和标准划分有一定的差异，除了营养物质（N、P）含量标准外，还包括物理、化学和生物指标等（表 1-4 、1-5）（周云龙等 2004；刘建康 1999）。因此，水华发生的原因可以概括为环境和生物两大因素。环境因素主要是光照、温度、pH、水深、水的流动性和水体营养水平，生物因素是蓝藻自身具备的一些生物特点和生态策略（ecostrategy）。

表 1-4 美国环境保护局的水体富营养化标准（周云龙等 2004）

项 目	贫 营 养	中 营 养	富 营 养
总磷/(mg /m ³)	<10	10~20	>20
叶绿素 a/(mg/m ³)	< 4	4~10	> 10
透明度/m	>3.7	2. 0~3.7	< 2.0
深水区溶解氧(饱和度)/%	>80	10~80	< 10

表 1-5 美国环境保护局的水体营养水平划分方法 (刘建康等 1999)

项 目	贫 营 养	中营养(前期)	中营养(后期)	富 营 养	重富营养
总氮/(mg/L)	<0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~1.0	>1.0
总磷/(mg/L)	<0.001	0.001~0.005	0.005~0.01	0.01~0.05	>0.05
BOD/(mg/L)	<1	1~3	3~5	5~8	>8
COD/(mg/L)	1	3	5	8	12
透明度/m	>4.0	4.0~2.0	2.0~1.0	1.0~0.5	<0.5

光照强度和光质对蓝藻的生长都有影响。高光强、长时间暴露能抑制大部分蓝藻生长,如颤藻长时间暴露于 $180\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (注: E 为光能单位,中文为“爱因斯坦单位”)时,生长就被完全抑制;长时间暴露于 $320\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的光强对多数蓝藻具有致死效应,而该光照强度还不到夏季湖泊表面光强 ($700 \sim 1000\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) 的一半。与此相反,非连续高强度光照却能使蓝藻达到生长的最大速率。蓝藻对光需求的另一个突出特征,是它们有一个非常优越的能量代谢平衡机制,即蓝藻细胞能在很低的能量状态下维持正常细胞功能和结构。因此,在低光照强度下,其他藻类的生长通常被抑制,而蓝藻却能良好地生长,这就成为它们压倒其他藻类的生态竞争优势。

温度是蓝藻水华形成的重要因素。由于多数蓝藻喜高温,因此,水华多发生在春末和夏季。该季节阳光充足、温度较高,水温多在 $25 \sim 35^\circ\text{C}$,有利于蓝藻生长和快速繁殖。温度在 20°C 以下时,蓝藻水华很少发生(宋立荣等 2001)。大部分蓝藻在 25°C 以上能获得最大生长速度;而绿藻和硅藻在该温度以上时,生长反而减慢,这也是蓝藻在温暖季节里比其他藻类竞争力强的原因之一。

除了光照和温度外,水深、水面大小和水的流动性等也和水华形成有重要关系,高流速河流一般不易形成蓝藻水华,多雨季节水华也不易发生。另外,蓝藻水华多发生于 pH 高的碱性水体。

决定蓝藻水华发生的营养因子主要是氮磷含量、二者的比例以及部分微量元素含量。一般认为高氮、磷含量是蓝藻水华发生的主要营养物质基础。同时,还有研究表明,蓝藻对氮、磷的亲合力高于其他浮游藻类,因而它们能够在氮、磷限制的环境下良好生长和繁殖,这是其重要的营养竞争优势之一(宋立荣等 2001)。另一个方面,一些蓝藻具有储藏磷的能力也使它们比其他藻类有较强的生态竞争优势。除了氮、磷浓度对蓝藻水华发生起决定性的作用外,较低的氮、磷比有利于水华发生,如氮、磷比为 $(10 \sim 16):1$,比氮、磷比为 $(16 \sim 23):1$ 更有利于水华蓝藻的生长和繁殖(刘建康等 1999)。

决定蓝藻形成水华最主要的生物因素有 3 个,这 3 个因素也是蓝藻有别于其他藻类的生理生态策略。首先,蓝藻水华浮沫(scum)的形成与蓝藻细胞和群体结构密切相关,很多水华蓝藻都具有一种调节它们在水层中位置的伪空胞(gas vesicle)结构。通过该结构调节,蓝藻能够控制其浮力,使其保持在合适光

强的水层区并高效率地利用资源。当光照过强时，很多气囊破裂，其浮力下降，藻体下沉，以避免高光强对藻细胞的损伤；而低光强时，它们又能增加气囊数量而使藻体上浮，直到获得合适光强，从而使群体高速增殖并在水面形成一层浮沫。

水华蓝藻所具有的另一个生理生态特点是：部分蓝藻具有固氮能力。如鱼腥藻、束丝藻、筒胞藻等蓝藻，它们利用其藻丝体所特有的异形胞，将大气中游离氮固定为藻细胞可利用的氮源，供给藻细胞生长和繁殖（张宪孔等 2001）。因此，在水体氮源不足时，它们仍然能够维持其正常生长和繁殖。

水华蓝藻的第三个生理生态策略是：某些水华蓝藻具有高效吸收利用外源无机碳的功能。即在低浓度 CO_2 介质中，它们可以通过高效地主动吸收浓缩外源无机碳，在细胞内积累比介质浓度高几百到几千倍的 CO_2 ，由此能够在所栖息的水环境中最大限度地竞争利用有限无机碳源，以保持其持续稳定的生长、繁殖（宋立荣等 2001）。

2. 蓝藻水华的危害

蓝藻水华的危害主要有以下 5 个方面：

(1) 影响环境景观，使饮用水质量下降

蓝藻水华使水体浊度增大，水色变深，透明度下降，这严重影响了湖泊的旅游观光价值。有些蓝藻在生长过程中或藻细胞分解时发出难闻气味，在饮用水处理过程中也不能去掉，使饮用水质量极度下降（宋立荣等 2001）。

(2) 养殖业危害

由于蓝藻的大量繁殖和分解，极大地消耗了水体溶解氧，致使养殖鱼类因缺氧浮头甚至死亡。

(3) 造成水体二次污染

蓝藻水华在富营养化湖泊发生时，水华浮沫经常部分或全部地覆盖水体表面，当水华腐败（群体解体和细胞降解）时，释放出来的有机物质远远超出水体的自净能力，因而导致水体发臭，严重污染水体并使水体失去利用价值。

(4) 使湖泊群落结构发生改变，物种多样性降低

蓝藻水华大量发生使水体透明度下降，且水华聚集于水表面形成厚厚浮沫，使光线不易进入水层，抑制了其他浮游生物和水生植物的生长而造成生存危机。同时，水华发生时，水体溶解氧浓度很低，这也会给需氧动物的生存造成威胁。

(5) 产生毒素

有些水华蓝藻能产生蓝藻毒素，对动物和人类健康造成危害。

3. 蓝藻水华的控制

如何有效地控制蓝藻水华（control of cyanobacterial bloom）不仅是当今科