

POYANG HU LIUYU
ZHUYAO SHUITI ZAOLEI FENBU YU
FANGKONG

鄱阳湖流域 主要水体藻类分布与防控

戴国飞 胡建民 杨平 邓春晖 宋立荣 李守淳 等 编著

非
外
借



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

鄱阳湖流域 主要水体藻类分布与防控

戴国飞 胡建民 杨平 邓春晖 宋立荣 李守淳 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书系统介绍了2014—2017年鄱阳湖流域主要河流湖库的藻类分布和蓝藻水华风险,详细论述了鄱阳湖湖区的蓝藻分布现状和暴发风险,总结了蓝藻水华控制和蓝藻毒素去除的技术手段和方法,并重点介绍了去除蓝藻水华的改性红壤法及其实践应用情况,探讨了凝胶离子材料和改性活性炭在蓝藻毒素去除中的初步效果。

本书可供从事水环境保护与修复研究的专家学者参考,也可供相关专业的高校师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

鄱阳湖流域主要水体藻类分布与防控 / 戴国飞等编
著. — 北京:中国水利水电出版社, 2020.9
ISBN 978-7-5170-8944-5

I. ①鄱… II. ①戴… III. ①鄱阳湖—流域—藻类—分布②鄱阳湖—流域—藻类—防治 IV. ①Q949.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第191024号

书 名	鄱阳湖流域主要水体藻类分布与防控 POYANG HU LIUYU ZHUYAO SHUITI ZAOLEI FENBU YU FANGKONG
作 者	戴国飞 胡建民 杨平 邓春晖 宋立荣 李守淳 等 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	清淤永业(天津)印刷有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 10.75印张 211千字
版 次	2020年9月第1版 2020年9月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	80.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



前言

鄱阳湖为我国最大的淡水湖，是一个过水型、吞吐型、季节性的湖泊，其丰水期与枯水期的面积和容量相差悬殊，造就了“丰水一大片，枯水一条线”的奇特景观。随着鄱阳湖流域人口的增长、工业化和城市化进程的加快，特别是近年来水产养殖业、矿产业、采砂业及沿湖工业和城镇化的快速发展，其湖区生态环境形势总体日益严峻，目前局部范围内已发生轻度富营养化甚至新型复合环境污染问题。近几年，围网、围堤以及底栖螺类大规模机械化、产业化捕捞等人为活动，使局部区域生境破碎和生物栖息地减少，湖泊生态系统失衡，湖区出现蓝藻水华。湖泊生态功能退化和富营养化藻类水华的发生严重影响当地百姓的生产、生活甚至用水安全，湖泊生态安全问题已成为制约区域社会经济可持续发展的重要因素之一。

鄱阳湖流域内河流湖库特别是鄱阳湖湖区的水体富营养化与蓝藻水华问题越来越受到社会各界的广泛关注，因其已对周边居民用水安全构成一定威胁，而成为该区域亟须解决的重大问题之一。如何保障鄱阳湖及其周边水体的“一湖清水”成为当前迫切需要研究解决的问题。富营养化水体水生态系统平衡遭到破坏的成因复杂，且污染源多、治理难度大、周期长，依靠单一的治理措施很难实现水体的恢复。因此以恢复水体生态系统平衡为最终目标，因地制宜地采取适合各个水体的综合防治措施是十分必要的。

本书系统介绍了2014—2017年鄱阳湖流域主要河流湖库的藻类分布和蓝藻水华风险，详细论述了鄱阳湖湖区的蓝藻分布现状和暴发风险，总结了蓝藻水华控制和蓝藻毒素去除的技术手段和方法，并重点介绍了去除蓝藻水华的改性红壤法及其实践应用情况，探讨

了改性活性炭技术和凝胶离子材料在蓝藻毒素去除中的初步效果。

本书共 7 章：第 1 章主要介绍藻类、蓝藻及鄱阳湖流域相关的必要知识，如蓝藻的结构和生长暴发的主要因子，以及本书采用的主要调查研究方法，由戴国飞、胡建民撰写；第 2 章主要介绍鄱阳湖流域大型湖库藻类现状与水华风险，由杨平、戴国飞撰写；第 3 章主要介绍鄱阳湖主要入湖河流藻类现状与水华风险，重点是鄱阳湖五大支流和主要入湖河流的水质与藻类情况，由杨平、方媛媛撰写；第 4 章选取鄱阳湖主湖区和边缘水体进行调查，主要是了解和掌握主湖区及边缘水体藻类现状与水华风险，由杨平、李守淳、虞功亮、李仁辉撰写；第 5 章采用室内研究、生态模拟实验并结合鄱阳湖野外生态调查的补充验证，研究重金属污染下鄱阳湖蓝藻毒素环境迁移规律，旨在阐明蓝藻毒素水环境迁移中重金属污染物的影响机制与作用过程，由戴国飞、胡建民、邓春晖撰写；第 6 章总结蓝藻水华控制的主要技术手段和方法，并重点介绍去除蓝藻水华的改性红壤法及其具体实践应用情况，由戴国飞、甘南琴、邓春晖撰写；第 7 章重点介绍常见的蓝藻毒素去除方法，并探讨改性活性炭技术和凝胶离子材料在蓝藻毒素去除中的初步效果，由戴国飞、宋立荣、邓春晖撰写。全书由戴国飞、胡建民、杨平统稿。

本书的撰写得到了江西省水利科学研究院领导和同事的大力支持，在此表示感谢，同时也感谢中国水利水电出版社的编校人员为本书出版付出的辛勤劳动。

由于作者能力和精力有限，特别是在野外调查中人力与物力资源较欠缺，书中的一些数据可能存在不当之处，仅供读者研究和参考使用，具体以权威部门发布的公开数据为准，敬请读者批评指正。

作者

2019 年 12 月

目 录

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	藻类的基本特征	1
1.2	蓝藻和蓝藻水华	1
1.3	鄱阳湖主要入湖河流及边缘水体概述	13
1.4	主要调查研究方法	19
第 2 章	鄱阳湖流域大型湖库藻类现状与水华风险	22
2.1	富营养化评价	23
2.2	藻类的种类组成	28
2.3	藻类的密度	43
2.4	藻类多样性指数	43
2.5	蓝藻的密度和生物量	45
2.6	小结	48
第 3 章	鄱阳湖主要入湖河流藻类现状与水华风险	49
3.1	水质评价	49
3.2	藻类的种类组成	53
3.3	藻类的密度	54
3.4	藻类多样性指数	54
3.5	蓝藻的密度和生物量	55
3.6	小结	58
第 4 章	鄱阳湖主湖区及边缘水体藻类现状与水华风险	59
4.1	富营养化评价	60
4.2	藻类的种类组成	64
4.3	藻类的密度	69
4.4	藻类的生物量	71
4.5	藻类的优势种	72

4.6	藻类多样性·····	78
4.7	水华蓝藻密度及生物量·····	80
4.8	小结·····	84
第5章	典型重金属在鄱阳湖湖区蓝藻毒素迁移中的复合作用 ·····	86
5.1	主要研究内容·····	87
5.2	主要结果与结论·····	88
5.3	鄱阳湖生态调查结果·····	96
第6章	蓝藻水华控制技术开发与应用 ·····	100
6.1	治源控污·····	100
6.2	综合修复·····	101
6.3	新型改性土壤的开发·····	109
6.4	改性土壤在蓝藻水华控制及水质净化中的应用·····	110
第7章	蓝藻毒素去除方法 ·····	131
7.1	物理方法·····	131
7.2	化学方法·····	133
7.3	生物降解法·····	138
7.4	凝胶离子材料快速去除蓝藻微囊藻毒素·····	138
参考文献	·····	158

绪 论

1.1 藻类的基本特征

藻类是一类低等植物。有的藻类具有叶绿素，能进行放氧的光合作用；植物体没有真正的根、茎、叶的分化；生殖器官是单细胞的，用单细胞的孢子或合子进行繁殖，绝大多数生长在水中。有的藻类无叶绿素，不能进行光合作用，或者在无光的条件下失去色素，营异养生活，但是它们的储藏物质是淀粉或副淀粉或油，与同类藻类相同（胡鸿钧等，2006）。淡水藻类类群通常分属于 13 个门：蓝藻门、绿藻门、硅藻门、裸藻门、金藻门、甲藻门、黄藻门、隐藻门、原绿藻门、灰色藻门、红藻门、定鞭藻门、褐藻门。在淡水生态系统中，常见的门类一般为前 8 个门，其他门类的藻类在淡水中极少，而且通常不是浮游种类。

除原核类型外，所有的真核藻类都有色素体。色素体形态虽然多种多样，但其超微结构基本上由两部分组成，即被膜和类囊体。无论是原核的蓝藻、原绿藻，还是真核的其他类型藻类，其光合色素系统中都含有叶绿素 a，与高等植物一样都是光合放氧的，而辅助色素（如胡萝卜素和叶黄素），依门类的不同，不仅种类千差万别，而且性质相同的成分数量也有多寡的区别。藻类的储藏物质因光合色素组成不一样其化学性质有明显的差别。

1.2 蓝藻和蓝藻水华

蓝藻（Cyanobacteria）为兼性光能自养型原核生物，又称蓝细菌。蓝藻能适应多种环境，在海洋、淡水、高山、冰雪甚至 85℃ 温泉中均可生存。已定名的蓝藻大约有 2000 种，广泛分布于世界各地，但主要还是分布在淡水中。有些蓝藻能和真菌、苔藓、蕨类、裸子植物等共生。藻类中蓝藻的繁殖方式是最简单的，可分为两种：一种是营养繁殖，包括细胞分裂（即裂殖）、群体破

裂和丝状体生成藻殖段等方式；另一种是一些蓝藻产生外生孢子或内生孢子实现无性繁殖。

近年来，人类活动导致的蓝藻水华逐渐引起人们的关注。富营养化是指由于湖泊水库接纳过量的氮磷等营养物质，引起藻类及其他的水生植物过度繁殖，水体透明度、溶解氧等发生剧变，导致水质恶化，水生高等植物逐渐消失，鱼类死亡，同时生物多样性下降、湖泊生态系统结构及功能受损。2009年我国重点监控的26个湖泊（水库）中，有1个水质达到Ⅱ类，占3.9%；5个水质达到Ⅲ类，占19.2%；6个水质为Ⅳ类，占23.1%；5个水质为Ⅴ类，占19.2%；多达9个水质为劣Ⅴ类，占34.6%，总氮和总磷是其中主要污染物。在这些湖泊中，共有11个处于富营养化状态，占42.3%；1个为重度富营养化，占3.8%；2个为中度富营养化，占7.7%；8个为轻度富营养化，占30.8%。

学者普遍接受将蓝藻分为颤藻目（Oscillatoriales）、真枝藻目（Stigonematales）、色球藻目（Chroococcales）和念珠藻目（Nostocales）。已知蓝藻大概有150属，约2000种，我国有记录的约有900种。蓝藻遍布于世界各地，多数是淡水种，分别属于微囊藻属（*Microcystis*）、色球藻属（*Chroococcus*）、颤藻属（*Oscillatoria*）、拟柱孢藻属（*Cylindrospermopsis*）、鱼腥藻属（*Anabaena*）、念珠藻属（*Nostoc*）以及束丝藻属（*Aphanizomenon*）等。已报道可以形成水华的有几十个属的上百种蓝藻，蓝藻水华的形成与蓝藻门40个属有关，其中最常见的类型有微囊藻、浮丝藻、束丝藻、鱼腥藻、节球藻等。

1.2.1 蓝藻的生理特性

1.2.1.1 光合系统

蓝藻是单细胞原核生物，不含典型叶绿体，与绿藻等真核藻类有明显不同。蓝藻的光合作用主要发生在细胞器类囊体膜上，光反应和电子传递也多在该处。蓝藻膜上含有进行光合作用所必需的多种蛋白体：光系统Ⅱ（photosystem Ⅱ，PSⅡ）主要分布在类囊体膜的垛叠区；光系统Ⅰ（photosystem Ⅰ，PSⅠ）和ATP合成酶则主要在类囊体的非垛叠区（肖艳，2011）。蓝藻类囊体含有3种主要的光合色素：叶绿素、类胡萝卜素及藻胆素。叶绿素和大部分类胡萝卜素均与蛋白质结合在一起，因此被称为捕光色素蛋白复合体。

1.2.1.2 CO₂ 浓缩机制

蓝藻在漫长进化过程中产生多种生理特征，使其从周围环境中获得的无机碳主动运输到细胞内，并在细胞内积累浓缩，最终提高细胞内CO₂浓度以满

足光合作用的需要,这一现象被称为“ CO_2 浓缩机制”。 CO_2 浓缩机制的运行,提高了蓝藻对 CO_2 的亲合力,降低了光呼吸,降低了 CO_2 补偿点,因而获得了与陆生 C_4 植物类似的功能(肖艳, 2011)。蓝藻 CO_2 浓缩机制的基本功能区是: ①功能中心,它是由 Rubisco 加氧酶和碳酸酐酶(carbonic anhydrase, CA)组成的蛋白结构羧体(carboxysome); ②无机碳的运输系统,由位于质膜和类囊体膜上的各种对无机碳(Ci)高、低亲和的转运泵组成,其功能是将外界 CO_2 和 HCO_3^- 转运到胞质中形成底物 HCO_3^- 。许多蓝藻通过改变转运泵的组成,使得自身在无机碳限制条件下提高对无机碳的亲和能力来完成光合作用(见图 1.1)(Badger et al., 2003)。

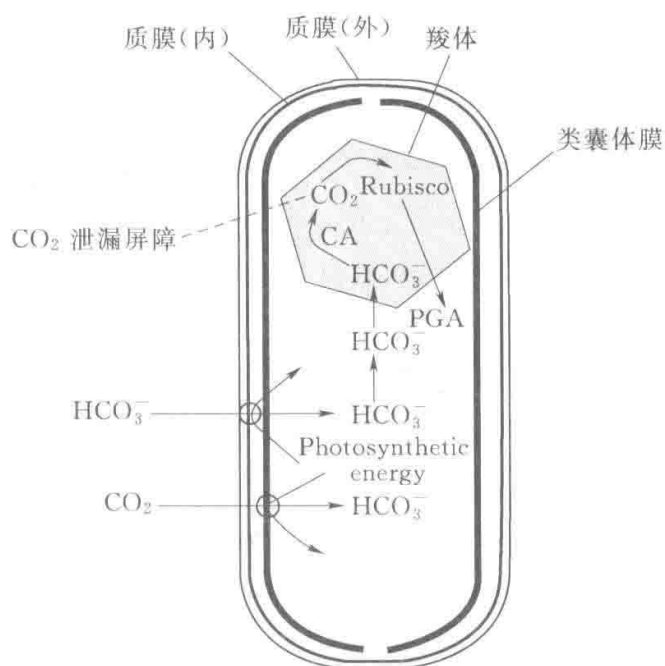


图 1.1 蓝藻的 CO_2 浓缩机制模型示意图

Photosynthetic energy—光合能; PGA—三碳化合物; CA—碳酸酐酶;

Rubisco—核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶

蓝藻 CO_2 浓缩机制在水生生态系统中具有独特的生理生态学意义,它提高了 Rubisco 羧化位点的 CO_2 浓度,减少了 O_2 对 Rubisco 的竞争抑制,减少了光呼吸;提高了蓝藻细胞对营养物质的利用效率;提高了细胞对外源无机碳的亲合力,减少了在高光强下光对细胞的抑制损伤。此外,蓝藻 CO_2 浓缩机制在水华形成和保持的过程中也起了积极的作用。

1.2.1.3 伪空胞浮力调节

含有气体的气囊最早在形成水华的蓝藻中被发现,气囊的结构具有显著的折光特征,在光学显微镜下略带红色。1965 年 Bowen 和 Jensen 运用超薄切片技术直接证实了这些气囊是由众多圆柱形的气泡叠加而成的,于是将这些气泡

命名为伪空胞 (Bowen et al., 1965)。蓝藻生物量增加和上浮是水华形成的关键,很大程度上取决于伪空胞和群体的功能。伪空胞是蓝藻细胞内部的一种特殊结构,可调节细胞自身在水体中的浮力,使细胞在水层中发生垂直迁移,这种活动具有一定的昼夜节律性和季节节律性。伪空胞在微囊藻自身浮力调节的功能上具有重要的意义,它对微囊藻休眠体的复苏、细胞上升和水华的形成起到重要作用。

1.2.2 常见蓝藻水华种类及其产毒特性

我国淡水水体中比较常见的水华蓝藻种类主要有微囊藻、束丝藻、鱼腥藻、节球藻、拟柱孢藻、颤藻、念珠藻和浮丝藻等,各种藻类的水华形态和产毒特性也各异。

1.2.2.1 微囊藻

微囊藻是最常见的蓝藻水华种类之一,微囊藻在野外一般以群体形式出现,群体尺寸从微小型到大型分布,形态一般有球形、椭圆形、不规则分叶状(或长带状)及不规则树枝状,可自由漂浮(虞功亮等,2007)。微囊藻细胞常松散(或紧密)地排列在同一个胶被中,胶被一般呈无色或微黄绿色,部分微囊藻胶被表面常带有明显的折光,并有一定溶解性,外形坚固,有的仅有模糊薄层,胶被紧贴或不紧贴微囊藻细胞。微囊藻细胞呈球形或近球形(分裂时为半球形),微囊藻单个细胞并不具备胶被结构,且内含气囊。藻细胞以二分裂形式进行繁殖,此时微囊藻群体瓦解,一般以小的细胞群或独立的单个细胞形式存在。在我国滇池微囊藻水华中常见的微囊藻有铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*)、惠氏微囊藻 (*Microcystis wesenbergii*)、水华微囊藻 (*Microcystis flos-aquae*)、绿色微囊藻 (*Microcystis viridis*) 和鱼害微囊藻 (*Microcystis ichthyoblabe*) 等,几种典型群体性水华微囊藻样图见图 1.2。

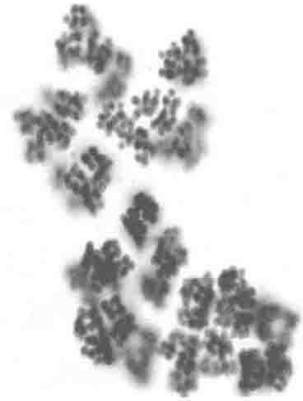
微囊藻常见的产毒种类有微囊藻毒素 (Microcystin)、鱼腥藻毒素 (Anatoxin, ANTX) 等,微囊藻毒素的化学结构见图 1.3。

1.2.2.2 束丝藻

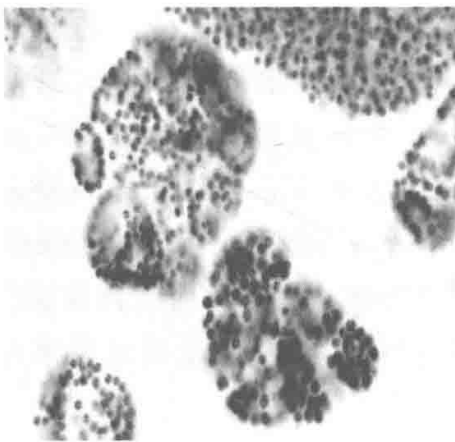
束丝藻水华与微囊藻水华的季节性更替,是我国滇池水华独特的一个现象,我国淡水水体较常见的有水华束丝藻 (*Aphanizomenon flos-aquae*),其形态特征为:藻丝一般比较直或稍有弯曲,藻丝侧面相连成束状群体;藻丝中部细胞呈短柱形或方形;藻体有明显的伪空胞结构;末端细胞尖细,延长成无色细胞;胶鞘模糊不清;异形胞间生呈各种形状,如圆柱形、近球形、椭圆形。此外吴忠兴等(2009)也报道了两株新的束丝藻——柔细束丝藻 (*Aphanizomenon gracile*) 和依沙束丝藻 (*Aphanizomenon issatschenkoi*)。



(a) 铜绿微囊藻
(*Microcystis aeruginosa*)



(b) 绿色微囊藻
(*Microcystis viridis*)



(c) 惠氏微囊藻
(*Microcystis wesenbergii*)



(d) 挪氏微囊藻
(*Microcystis novacekii*)

图 1.2 几种典型群体性水华微囊藻样图

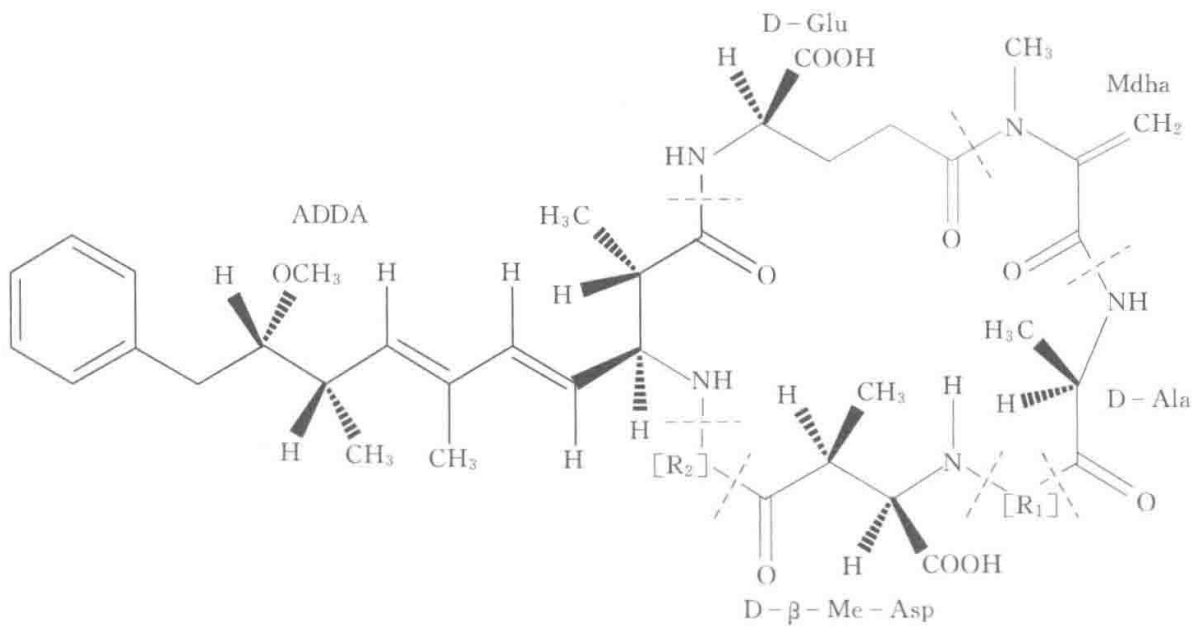


图 1.3 微囊藻毒素的化学结构

束丝藻产的毒素有石房蛤毒素 (Saxitoxin) (图 1.4)、鱼腥藻毒素 (Anatoxin-a) 和拟柱孢藻毒素 (Cylindrospermopsin) 等 (Ballot et al., 2010)。

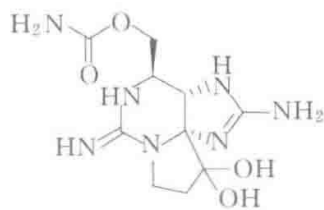


图 1.4 石房蛤毒素的化学结构

石房蛤毒素是一种四氢嘌呤生物碱类神经毒素，分子式为 $C_{10}H_{17}N_7O_4$ ，相对分子质量为 299Da，具有相当大的神经毒性。石房蛤毒素毒性机制为：其作用于神经突触的前膜，通过与膜表面毒素受体的结合，阻断了突触后膜的 Na^+ 通道，持续性去极化作用由此而形成，从而特异性地干扰了神经肌肉的传导过程，使神经随意肌松弛麻痹，进而导致一系列的中毒症状。

石房蛤毒素在非常低的浓度下 ($3 \times 10^{-7} \text{ mol/L}$) 即可阻断 Na^+ 通道。石房蛤毒素属于胍类毒素，其活性部位为胍基，胍基与细胞膜上的 Na^+ 通道位点上的氨基酸残基之间具有高度的亲和性。通过选择性阻断 Na^+ 内流，进而阻碍生物体动作电位形成。

1.2.2.3 鱼腥藻

鱼腥藻 (图 1.5) 隶属蓝藻门 (Cyanophyta) 念珠藻目 (Nostocales)，很多鱼腥藻可通过光合作用和固氮作用高效利用碳、氮，从而达到快速生长的目的。比较常见的水华鱼腥藻 (*Anabaena flos-aquae*) 是造成蓝藻水华的主要种类之一。

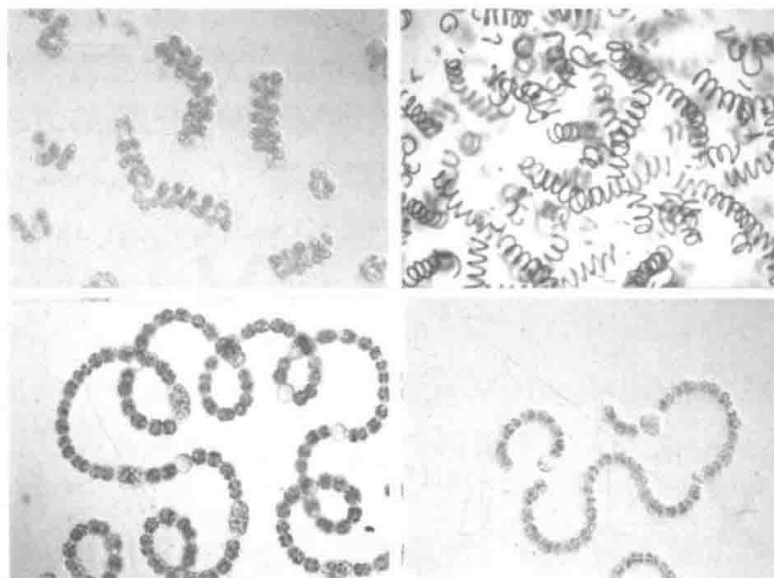


图 1.5 鱼腥藻

(中国科学院水生生物研究所淡水藻种库提供样图)

鱼腥藻产的毒素种类较多，主要有微囊藻毒素、鱼腥藻毒素-a (Anatoxin-a) (图 1.6)、石房蛤毒素 (Saxitoxin)、拟柱孢藻毒素 (Cylindrospermopsin) 等 (Rapala et al., 1998)，其中鱼腥藻毒素-a 是最为常见且

是在鱼腥藻内含量最高的一种毒素。鱼腥藻毒素-a 有急速致死因子之称。1977 年, Devlin 用水华鱼腥藻 NRC-44-1 分离出了鱼腥藻毒素-a, 并证明它是一种神经毒碱, 鱼腥藻毒素-a 相对分子质量为 166 Da (Devlin et al., 1977)。鱼腥藻毒素-a 是一种毒性剧烈的生物碱神经毒素, 它对老鼠的半致死量 LD_{50} (ip. mouse) 约为 $200\mu\text{g}/\text{kg}$ 。鱼腥藻毒素-a 具有很强的神经肌肉去极化阻断作用, 是一种强力的后突触去极化神经肌肉阻断剂。动物中了鱼腥藻毒素-a 毒后会出现肌肉抽搐、角弓反张、呼吸肌痉挛及流涎等症状 (鸟类), 到目前为止, 还没有合适的解毒剂可以对鱼腥藻毒素-a 进行解毒。鱼腥藻毒素-a 分子结构具有半刚性, 极似乙酰胆碱, 但不能被真核生物种的乙酰胆碱酯酶及其他催化酶催化降解, 因而活性高, 毒性大。鱼腥藻毒素-a 神经毒素并不稳定, 半衰期较短, 在强光和高 pH 条件下, 可迅速降解为无毒, 此外, 已经有非常多的技术可以快速降解去除鱼腥藻毒素-a (Afzal et al., 2010)。

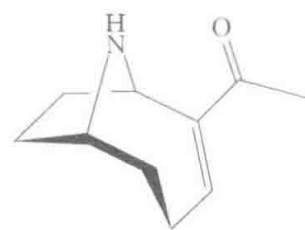


图 1.6 鱼腥藻毒素-a 的化学结构

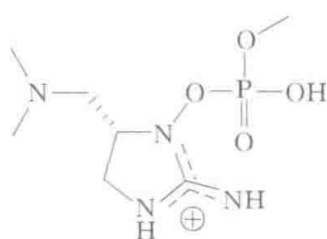


图 1.7 鱼腥藻毒素-a (s) 的化学结构

鱼腥藻毒素-a (s) (图 1.7) 是一类含磷的神经毒素, 相对分子质量为 252Da, 最早是从水华鱼腥藻 NRC525-17 中分离到的。通过二维核磁共振测定得知, 鱼腥藻毒素-a (s) 分子结构中存在 S 构型的手性碳原子, 鱼腥藻毒素-a (s) 极性较强, 易溶于水等极性溶剂, 但在碱性条件下不稳定。同鱼腥藻毒素-a 相似, 鱼腥藻毒素-a (s) 也是生物碱类物质, 具有与鱼腥藻毒素-a 类似的功能, 可影响乙酰胆碱的释放, 从而使得动物的神经肌肉过度兴奋进而痉挛, 最后动物因呼吸受限窒息死亡。毒素专一性地作用于外周神经系统, 而不抑制中枢神经系统, 因而死亡过程缓慢。鱼腥藻毒素-a (s) 的 LD_{50} (ip. mouse) 大概在 $20\sim 30\mu\text{g}/\text{kg}$, 毒性几乎是鱼腥藻毒素-a 的 10 倍。但是有报道显示高浓度的解磷定 (2-PAM)、双解磷 (TMB₄) 能使被鱼腥藻毒素-a (s) 抑制的酶有效恢复, 从而基本达到解毒目的 (Hyde et al., 1991)。

1.2.2.4 节球藻和拟柱孢藻等

节球藻和拟柱孢藻这两种藻也是蓝藻水华中常见的有害藻类。节球藻会产生节球藻毒素 (Nodularin) (图 1.8), 该毒素是一种环状五肽肝毒素, 相对分子质量为 824Da。节球藻毒素的毒性比较强, LD_{50} (ip. mouse) 为 $30\sim 50\mu\text{g}/\text{kg}$ 。人体直接接触含节球藻毒素的水, 如在受污染湖泊、河流中进行游泳等娱乐活动, 会导致皮肤和眼睛过敏, 发烧及急性胃肠炎; 经常暴露于含有毒素的水

体,则会引起皮肤癌、肝炎甚至肝癌。节球藻毒素的靶器官为肝脏,是极强的促肿瘤剂,其对人类健康的危害正日益受到世界环境领域工作者的关注。

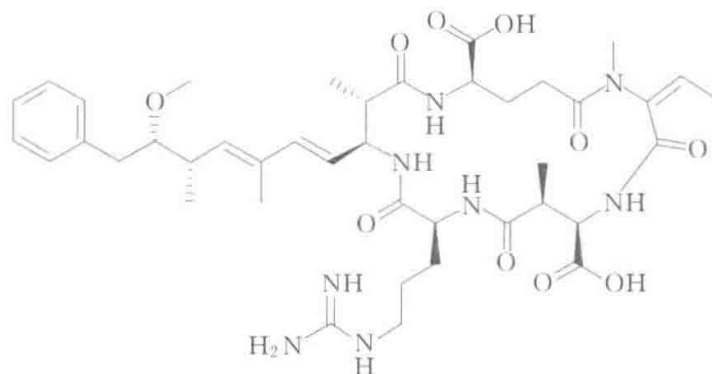


图 1.8 节球藻毒素的化学结构

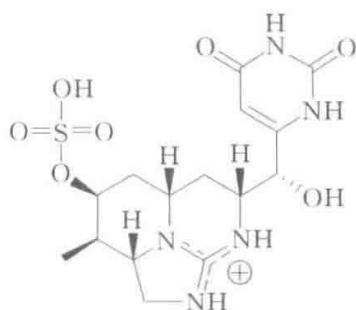


图 1.9 拟柱孢藻毒素的化学结构

拟柱孢藻在水华中会产生拟柱孢藻毒素 (Cylicindrospermopsin) 和石房蛤毒素 (Saxitoxin) 等。拟柱孢藻毒素也是一种肝毒素,其分子结构见图 1.9。它的靶器官为肝脏和肾脏,研究表明拟柱孢藻毒素可能使细胞产生 DNA 损伤,引起基因突变,从而导致动物畸形生长,因此水体中存在的拟柱孢藻毒素对人体和动物的健康是个很大的威胁 (Zegura et al., 2011)。

此外,常见的蓝藻水华种类还有颤藻 (*Oscillatoria*) [其主要产微囊藻毒素,鱼腥藻毒素-a,鱼腥藻毒素-a(s)],以及念珠藻和浮丝藻 (这两种藻类主要产微囊藻毒素)。

1.2.3 蓝藻水华暴发影响因素

目前关于蓝藻水华形成的机理已有较多的研究,通常认为水华暴发机理与气候 (温度、大气压等)、水文 (水量、水流)、水体中的氮磷营养盐及蓝藻自身的生理特点等相关。

1.2.3.1 水温和光照

水温和光照是影响藻类季节演替的主要物理因子。一般认为蓝藻生长的最佳水温是 28℃,在冬季,水温、光强都很低,藻类生产力不高,数量很少;春季,虽然水温没有显著增高,但是日照时间变长,光合作用强度增加,硅藻会在群落中占优并大量增殖;春末夏初则以绿藻为主,蓝藻则在温度较高的夏季中后期占优;秋末则是以硅藻为优势。温度对藻类生长的影响比较突出,它决定生物细胞内酶反应的速度,每种藻类都有一个温度适宜的范围。通常情况下,蓝、绿藻喜高温,因此多出现在夏季,夏季也往往是水华的高发季节。有

研究指出,水华鱼腥藻在 5℃ 时数量很少,到 15℃ 时一直保持着相对同样水平,水华鱼腥藻的暴发则发生在 15~20℃,当温度达到夏季最高值时,这类种群水平很低甚至消失;水华束丝藻在温度达到 20℃ 之前很少见;铜绿微囊藻水华则发生在 17.5~26℃ 之间。所以蓝藻门种类之间的优势演替在很大程度上受到水温的影响。

光照的影响主要表现在藻类光合作用的速率随着光强的变化而变化,以及不同种类的藻对不同波长、不同强度的光敏感性不同。光照强度和光暗比都对蓝藻的生长有很大的影响,光照时间越长,蓝藻获得的能量越多,越有利于合成各种细胞组成成分,促进细胞生长繁殖。夏季快结束时混合层往下迁移,导致水下光线变弱,喜弱光的直链硅藻、微囊藻等占据优势。太湖梅梁湾浮丝藻在 6 月出现高峰,7—9 月微囊藻几乎完全占据优势。由于浮丝藻在强光照射下会产生光抑制,而微囊藻在强光环境中能较好地生长,所以夏季梅梁湾的微囊藻取代浮丝藻成为优势种。

1.2.3.2 pH、透明度

因为碱性系统易于捕获大气中的 CO_2 从而出现较高的藻类生产力,而酸化水体中藻类的生长潜力微弱。每种藻类都有其适合的 pH 范围。许多研究表明,水体 pH 的变化对浮游藻类的种类组成和分布规律有重要的影响,且蓝藻偏好较高的 pH。赵孟绪等(2004)研究发现,汤溪水库微囊藻水华期间各采样点 pH 大于 9.0,且蓝藻密度与 pH 呈显著的正相关。发生水华时,较高的蓝藻密度对水体 pH 具有明显影响,微囊藻可以借助悬浮机制吸收“空气-水”界面的 CO_2 ,而没有悬浮机制的藻类由于缺乏 CO_2 ,难以形成优势种。

透明度是水体能见程度的一个量度,能够直观反映湖泊水下光场的分布情况,也是评价水体富营养化的一个重要指标。许多研究表明,藻类、悬浮物和溶解性有机物是影响透明度的物质,如悬浮物是太湖水体透明度最重要的影响因素,而藻类是滇池、杭州西湖等水体透明度的主要影响因子。在流溪河水库,春季由于大量悬浮颗粒物的输入,使水库透明度大为降低,较低的透明度抑制了藻类的生长,水体的透明度也会影响藻类的垂直分布状况。蓝藻不能适应含有悬浮颗粒的水体,而含有一定量悬浮颗粒的水体却对于硅藻的生长是有好处的,但当悬浮颗粒过多时,任何藻类都难以成功地生长繁殖。

1.2.3.3 氮、磷营养盐浓度

沃伦韦德确定的湖泊氮、磷营养元素双控制的指标或标准为:无机氮 0.5mg/L,总磷 0.03mg/L。湖泊或水库的营养盐浓度值超过该标准,即可能已经发生或存在藻类水华暴发的风险。湖泊发生富营养化后,氮、磷浓度大幅上升,原因是湖库生态系统中的营养盐自身循环效应和沉积物的内源性营养盐

释放。国际公认的磷控制标准为：总磷浓度为 0.03mg/L ；湖库水质营养盐浓度超过该标准，即可能已经发生或存在藻类水华暴发的风险。

在合适的光照、温度、pH、硅以及其他营养物质充分的条件下，植物的生长取决于外界供给它们养分最少的一种或两种。从藻类原生质分子式 $\text{C}_{106}\text{H}_{263}\text{O}_{110}\text{N}_{16}\text{P}$ 可以看出，生产 1kg 鲜藻类，需要消耗碳 358g 、氢 74g 、氧 496g 、氮 63g 、磷 9g （即 1g 磷可生产 111g 鲜藻， 1g 氮可生产 15.87g 鲜藻）。由于氢和氧可以来自水分子，因此，要想控制水体富营养化，必须控制水体中营养元素含量及其比例。藻类（细胞）的碳氮磷比值，按照碳、氮、磷的原子量比值为 $106:16:1$ ，按重量比约为 $40:7:1$ 。这三种元素中某一种的相对量低于此比值，其他两种就成为生理需要上的多余，而不足的这一种即成为限制因子，因此，一般认为氮和磷之比大于 7 时为缺磷，小于 7 时为缺氮。

然而，由于磷的循环速率较氮为快，如在澳大利亚的乔治湖，氮的周转时间为 0.66d ，磷仅 0.5d 。在实际应用时的 N/P 控制指标：如以溶解性氮和溶解性磷的比值 $5\sim12$ 为指标，低于 5 时缺氮，大于 12 时缺磷；同时以总氮和总磷比值 $10\sim17$ 为指标，低于 10 时缺氮，高于 17 时缺磷。在富营养化的过程中，首先是磷的增加。由于磷极快被利用并且循环速度很快，所以总储量虽然增大但瞬时浓度不一定增大，且甚至常常降低；同时变化幅度增大。磷的增加促进了藻类的产量。当藻类大量发展时，氮的消耗量可能超过补充量，因此引起上层水中氮的不足。这时，固氮蓝藻的出现扩大了氮的来源。通常在中等深度、富营养化分层的湖泊中固氮蓝藻易暴发，它们在氮缺乏的环境中能够从氨氮中获取氮元素从而具有竞争优势。这是一般湖泊或水库常发生蓝藻水华的根源之一。

对波罗的海的研究表明，水体富营养化导致有机物沉积引起底部缺氧，这部分水量越高，水体中总溶解性氮越低，意味着厌氧条件下氮的去除量增加。内源磷的释放以及溶解性无机氮的去除导致水体中氮磷比较低，这也是促进蓝藻固氮的主要因素之一。由于波罗的海开发水域内的蓝藻暴发似乎受内部作用影响较强，外源氮的削减对其作用受时间限制。较长的时间尺度下，外源性磷输入量的减少有可能减少蓝藻暴发的可能性；但在时间尺度较小时，内源性磷的输入量增加将会抵消外源性磷减少的抑制作用。最终这个内源磷输入、脱氮以及固氮蓝藻暴发的概率组成了一个恶性循环过程。若想有效地减少蓝藻暴发及水体富营养化，减少外源性氮、磷的输入显得尤为关键。

蓝藻中的许多种类具有固氮能力，例如，鱼腥藻、束丝藻、拟柱孢藻、胶刺藻和节球藻等，都具有固氮功能。除了蓝藻之外，水体中的许多细菌也具有固氮能力，例如，以梭菌为代表的厌氧性自生固氮菌和光合细菌中的红螺菌属以及绿硫菌属，以及芽孢杆菌属、螺菌属、肠杆菌科的一些属种，反硫化细