

文章编号:1004-8227(2010)12-1471-07

蓝藻水华的成因及其生态控制进展

胡传林, 万成炎, 吴生桂, 丁庆秋, 潘磊

(水利部中国科学院水工程生态研究所, 湖北 武汉 430079)

摘要:从水体生态系统的平衡、供水水质、人类及其它动物的健康风险、水域生态景观等方面分析了蓝藻水华的危害。对蓝藻水华形成的内在因素(高温适应的一系列特殊的生化调控机制或特性、三套色素系统——低光补偿机制、奢侈消费机制、固氮——营养补偿机制、休眠——回避不良条件机制、产生天然毒素来抑制竞争者和捕食者的机制)和环境因素(物理,如温度、光照、扰动及混合和水的滞留时间等;化学,如主要营养盐、微量营养元素、溶解无机碳、溶解有机碳和盐度等;生物因子,如牧食、微生物作用和与较高等动植物的共生等)进行了分析。并对蓝藻水华的生态控制(微生物控藻、大型水生植物抑藻、水生动物控藻如经典生物操纵、非经典生物操纵和罗非鱼控藻)的研究进展进行了综述。

关键词:蓝藻水华;成因;生态控制

文献标识码:A

随着湖泊富营养化问题的加剧,水华的暴发问题越来越被人们所重视。当外界环境条件适宜时,浮游生物会大量繁殖,从而形成丝带状或片状物质漂浮在水面,有时甚至会覆盖水体大部分的水域。因占优势浮游生物的颜色不同,水体水面往往呈现出蓝色、红色、棕色、乳白色等不同颜色,这种现象在江河、湖泊中称为水华,在海洋中则称为赤潮或褐潮。绝大部分的水华是由浮游藻类(包括蓝藻门、绿藻门、甲藻门、裸藻门、隐藻门等)引起的,也有部分是由浮游动物——腰鞭毛虫引起的^[1]。在各种水华当中,蓝藻水华发生的范围最广,危害最大,对人类健康的危害也最大^[2]。在世界范围内,蓝藻水华发生的频率与严重程度都呈现出迅猛的增长趋势,其发生的地点遍布全球各地^[3]。在我国,不仅有许多富营养型湖泊如巢湖、太湖和滇池等连年发生蓝藻水华,甚至有些流速较大的水体如汉江、钱塘江等也发生蓝藻水华^[4]。特别是在2007年5月底在无锡贡湖水厂发生因蓝藻水华而导致的水污染事件,引起了人们对蓝藻水华极大的关注。

1 蓝藻水华及其危害

1.1 蓝藻水华

蓝藻(或蓝细菌 Cyanobacteria)是地球上最早

出现的光合自养生物,它们利用水作为电子供体,利用太阳光能将 CO_2 还原成有机碳化合物,并释放出自由氧^[2]。其主要特征是:植物体简单,单细胞,各式群体和丝状体;不具有鞭毛,不产游动细胞,一部分丝状种类能伸缩或左右摆动;细胞壁缺乏纤维素,由黏肽组成,壁外常形成黏性胶质鞘;细胞无色素体,通过含有色素的光合片层进行光合作用,吸收 CO_2 和释放 O_2 ;细胞中无真核,但细胞中央含有核物质,通常呈颗粒状或网状,没有核膜和核仁,具有核的功能^[5]。

目前我国常见的蓝藻水华种类主要包括微囊藻(*Microcystis*)、鱼腥藻(*Anabaena*)、束丝藻(*Aphanizomenon*)、颤藻(*Planktothrix*)、节球藻(*Nodularia*)、鞘丝藻(*Lyngbya*)、螺旋藻(*Spirin*)等。

1.2 蓝藻水华的危害

国内外已有不少关于蓝藻水华危害的报道^[4~15]。蓝藻水华的危害主要表现在以下几个方面。1)破坏了水体生态系统的平衡:水体是一个生物与生物、生物与环境之间相互依存和相互制约的复杂生态系统。当蓝藻水华暴发时,大量增殖的蓝藻会降低水体中的溶解氧含量,降低水体透明度,堵塞鱼、虾、贝及许多小型水生动物的呼吸和滤食器官,分泌一些抑制其他水生生物生长的化学信息素

收稿日期:2010-03-05;修回日期:2010-06-26

基金项目:湖北省科技攻关项目(2006AA201B26)和科技部农业科技成果转化资金项目(2008GB23320437)联合资助。

作者简介:胡传林(1935~),男,安徽省泾县人,研究员,主要从事生态学研究。E-mail:chuanlinhu@163.com

等,从而导致其它水生生物大量死亡,最终破坏水体生态系统的平衡。2)影响供水水质,增加供水成本:当作为供水水源的水体发生了蓝藻水华时,自来水会出现异味和有毒有害物质^[16]。为了消除水中的异味和有毒有害物质,需要对水进行相应的处理,因此会增加水处理费用,降低产水率等。3)危害人类及其它动物的健康: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,上述毒素的致毒类型包括肝毒性、神经毒性、遗传毒性、皮炎毒性等,其中以肝毒性的微囊藻毒素(microcystin)危害最大。另外,在水生动物体内积累的藻毒素,包括鱼、贝和浮游动物等,有可能通过食物链的累积效应从而危害人体健康。4)破坏水域生态景观:当蓝藻水华暴发时,水体水面被厚厚的蓝藻水华所覆盖,水体透明度下降,颜色变绿,加之死亡的浮游生物和鱼类漂浮在其中,不仅使原来干净、清澈、透明的水体变得色泽混杂,浮游藻类死亡后沉入水底并堆积使水体变浅,加速了湖泊、水库的沼泽化进程,破坏了原有的生态景观。

2 蓝藻“水华”的成因及其影响因素

蓝藻水华的暴发是水体富营养化特征之一。水体富营养化是指大量的氮(N)、磷(P)等无机营养物质进入湖泊、水库等相对封闭、流速缓慢的水体,加速了浮游植物和其他水生植物的大量繁殖,导致水体溶解氧(DO)下降,水质恶化的现象^[17]。秦伯强等认为蓝藻水华的发生既可能是由于水体中氮、磷等无机营养物质大量增加导致的上行效应的结果,也可能是由于控制浮游植物的浮游动物缺失导致的下行效应的结果。但在绝大多数情况下,蓝藻水华的暴发是氮、磷等无机营养物质增加的结果^[18]。潘晓洁认为蓝藻水华现象的形成必须有 3 个要素:浮游蓝藻优势种,旺盛生长繁衍的环境,使之集聚的自身和外力条件^[5]。我们认为蓝藻水华的暴发是蓝藻内在的生理学特性与适宜的环境条件叠加的生态学结果。下面将从蓝藻水华形成的内在因素和外在环境因素两个方面来探讨蓝藻水华的成因及其影响因素。

2.1 蓝藻水华形成的内在因素

蓝藻是地球上最早出现的光合自养生物,在对地球早期恶劣环境的适应过程中,形成了许多有利于生存竞争的有效机制。

(1)蓝藻有对高温适应的一系列特殊的生化调

控机制或特性:包括类囊体不同脂肪酸比例的变化、DNA 和蛋白质合成系统及光合系统的高热稳定性^[19]。大部分蓝藻的最适温度为 25~35℃^[20~22],高于绿藻(Chlorella)和硅藻(Bacillariophyta),这使得大部分蓝藻水华在夏季更具有竞争优势。

(2)蓝藻的浮力调节机制:通过形成伪空胞,克服下沉。伪空胞是圆柱体的空泡,直径大约 75 nm,长度将近 1 μm。这些仅有蛋白质组成的圆柱体结构两末端为锥形,由 2 nm 厚的单层薄膜组成^[23~25]。

(3)蓝藻的三套色素系统——低光补偿机制:水深会加剧太阳辐射的衰减,影响初级生产者的光合作用,富营养型水体较大的浊度也会使初级生产者的光合作用受到抑制,因此在形成水华的水体中耐低光强生长的物种在竞争中将具有优势。蓝藻具有三套色素系统,还有藻胆色素系统,藻蓝蛋白(藻蓝蛋白、别蓝藻蛋白)和藻红蛋白(藻红刺酮碱),使它们的捕光光谱更宽(500~650 nm),在弱光条件下吸收的光能的本事更大,光强 1 000 lux 左右的条件它们能够很好生长,进行放氧光合作用^[5]。

(4)蓝藻的奢侈消费机制:蓝藻往往吸收水体中过量的磷、氮、碳等无机营养元素,以一种特别的形式(如多磷酸体)储藏在细胞内^[26]。而且这一机制不会因水体微环境的变化而发生“供应不足”,相反,它们能始终保持旺盛繁衍的状态,除非蓝藻细胞本身或者种群演替进入迟滞阶段。

(5)固氮——营养补偿机制:蓝藻是唯一能利用大气中的分子态氮进行生物固氮的藻类。蓝藻能够以不同的方式(空间隔离或者时间隔离方式)创造细胞内厌氧微环境,通过其细胞中固氮酶的作用,将大气中游离态的分子氮还原成可供利用的氮素化合物^[27]。能固氮的蓝藻包括鱼腥藻(*Anabaena*)、水华束丝藻(*Aphanizomenon flos-aquae*)、拟筒胞藻(*Cylindrospermopsis*)等^[5]。因此在环境中外来氮源不足而水体磷充足时,它们比其他自养生物更具有竞争优势,更容易形成水华。

(6)休眠——回避不良条件机制:蓝藻有一套休眠机制,当外界生长环境不利时藉这种休眠机制沉入底泥,度过“难关”。一旦条件好转,这些休眠体就复苏、萌动、繁殖、上浮乃至再形成水华。其休眠机制的表现形式多样,有的形成厚壁孢子,有的形成藻殖段,有的只是简单地形成非专性结构的休眠体^[28~31]。这种机制可以使蓝藻渡过生长环境恶劣的时期从而为种群在生长提供了必要的种源。

(7)蓝藻通过产生天然毒素来抑制竞争者和捕

食者的机制:有些蓝藻通过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)来抑制其竞争者(其他浮游植物和水生高等植物)和捕食者(鱼类、浮游动物)^[32~38]。

2.2 蓝藻水华形成的环境因素

Paerl 认为影响蓝藻生长及水华暴发的环境因

子主要包括:水的垂直分层和稳定性、扰动、水滞留时间、N 和 P、有机质、铁(Fe)和微量元素、电导和盐度,还有与微生物、竞争者和消费者的相互作用、物种的人为引入或移去和气候变化等^[39]。影响蓝藻生长和水华形成的环境因子如表 1 所示。

表 1 影响蓝藻生长和水华形成的环境因子^[2]

Tab.1 Environmental Factors Influencing Cyanobacterial Growth and Bloom Formation

影响因子	影响和蓝藻效应
物理因子	
温度	温度大于 15℃ 时有利于蓝藻生长,许多种类的适宜温度大于 20℃
光照	许多形成水华的种属喜好或耐强光,而其他种类适应遮阴
扰动和混合	许多形成水华的种属在一定空间尺度上喜好低扰动以及较弱的混合条件
水的滞留时间	所有种属都喜欢长的滞留时间
化学因子	
主要营养盐(N 和 P)	N 和 P 的富集有利于非固氮种类的生长,低 N/P 比(及高浓度 P 的富集)有利于固氮蓝藻的生长
微量营养元素(Fe、金属)	Fe 用于光合作用、NO ₃ 利用及固氮,有周期性 Fe 限制的证据。也需要其他金属(如 Cu、Mo、Mn、Zn、Co),但不会成为限制因子
溶解无机碳(DIC)	DIC 可限制浮游植物生长,但是蓝藻可以克服这一问题;DIC 限制和高 pH 反而可能使形成蓝藻水华的蓝藻更具有竞争优势
溶解有机碳(DOC)	许多形成水华的蓝藻能利用 DOC,水华常出现在富含 DOC 的水体
盐度	本质上并不限制蓝藻,但是一些形成水华的种属(如鱼腥藻、微囊藻)无法在咸水中生存,而其他属(如节球藻)耐盐
生物因子	
牧食	属选择性因子,有利于不可食的大型丝状、群体及对浮游动物有毒的蓝藻种属
微生物作用	蓝藻-细菌作用可能促进蓝藻生长和水华形成/持续;这种相互作用可能是化学介导(如“毒素”的功能);一些蓝藻-原生动物相互作用也可能是互惠的;有证据显示存在病毒和细菌引起的对蓝藻的拮抗作用(如溶菌作用)。但是,这些并不是控制水华发生的常见机制。存在蓝藻-微生物对营养盐的竞争,这可能是一种竞争机制
与较高等动植物的共生	蓝藻附生/体外寄生或共生于其他藻类、蕨类植物和维管植物,许多蓝藻是专性的,包括固氮蓝藻的种属

3 生态控制

在过去的几十年中,各国学者对富营养化水体的蓝藻水华控制尝试了许多方法和途径^[40~44]。根据其控藻机理,上述方法和技术可归纳为以下几种^[39]。

- (1)化学法:采用杀藻剂,如松香胺类、三氮衍生物、有机酸、醛、酮以及季胺化合物等有机物和铜盐(硫酸铜、氧化铜)、高锰酸钾、磷的沉淀剂(Fe²⁺、Fe³⁺ 盐等)、氯气、臭氧、漂粉精等无机物^[45]。硫酸铜是应用最为广泛的杀藻剂;
- (2)机械清除法:采用重力振动、旋振和离心等方法将藻类收获并使之与湖泊水体分离^[46,47];
- (3)营养控制法:调节营养盐的输入,主要是控制磷的输入^[48];
- (4)曝气混合法:通过机械混合或曝气破坏水层^[49];
- (5)水动力学控制法:如通过增加湖水流量来减

- 少滞留时间^[49];
- (6)生物控制法:采用经典、非经典生物操纵法及微生物杀藻技术等方法来控制蓝藻。
- 由于前 5 种方法存在不同程度的缺陷(化学法除对水体产生污染外,还可能对鱼类等其他生物种类也产生毒害作用;机械清除法成本和能耗过高;营养控制法代价过于昂贵;曝气混合法能耗和运行成本太高;水动力控制法能耗过高),因此第 6 种方法(生物控制法)越来越得到人们的重视。
- 生物控制法主要包括微生物控藻、大型水生植物抑藻、水生动物控藻。

3.1 微生物控藻

通过微生物控制蓝藻水华是近年来探索的有效途径之一,其中溶藻微生物被认为在维持蓝藻生物量平衡方面起重要作用^[50]。溶藻微生物包括溶藻病毒、溶藻真菌和溶藻细菌等。近年来,新的溶藻细菌被不断发现^[51~54]。其中粘细菌和假单胞菌是最主要的溶藻细菌。溶藻细菌有直接溶藻和间接溶藻两种作用方式:直接溶藻即直接进攻宿主,它需要细

菌与藻细胞直接接触,甚至侵入藻细胞内;间接溶藻即间接进攻宿主,主要包括细菌同藻类竞争有限营养或细菌分泌胞外物质溶藻^[55]。

以微生物治藻作为水华生物防治的一个新对策,尚需其他治理方法的配合,而且还有许多方面值得考虑和进一步探索。比如蓝藻水华是过量的外源氮、磷等无机营养元素导致水体富营养化的表征之一,溶藻后水体中大量的氮、磷等无机营养元素如何才从水体中去除,否则当外界环境适宜时水华会重新暴发;溶藻后有时会导致藻毒素的陡然释放,引起水体中藻毒素浓度增加,会危害水体中的水生生物,从而导致新的生态问题。这些问题需要进一步的研究。

3.2 大型水生植物抑藻

大型水生植物与蓝藻之间存在相生相克的现象。大型水生植物不仅能够快速地竞争性的吸收水体和沉积物中的营养盐^[56~58],而且有遮光作用^[59],还能分泌产生化感物质抑制浮游植物生长^[60,61]。因此,水生高等植物被广泛应用于降低湖泊水体营养盐负荷、控制藻类生长、调节湖泊生态系统等^[62~64]。

由于植物化感物质具有高效性、选择性和无污染性,应用在抑制藻类繁殖上不仅可以有效地抑制藻类的生长,且不会污染水体造成新的生态问题,被认为是颇有前途的一种抑藻手段,但目前有关化感物质的大都是在自然界不可能出现的化感物质浓度下获得的,要正确评价植物化感物质在藻华水体中的真正作用,显然需要自然界可能出现的浓度范围内更长时间的试验。另大型水生植物衰败后会大量释放氮和磷,及水体浊度的增加,可能更加有利于蓝藻水华的发展^[12],有关这一点应引起高度重视,有必要进行进一步的研究。

3.3 水生动物控藻

利用水生动物来控蓝藻,主要基于对水体浮游动物和鱼类群落结构的改变,通过增加对蓝藻的牧食压力来控制蓝藻。水生动物控藻主要是采用生物操纵方法来控藻。Shapiro 等首先提出了“生物操纵”的概念:“通过一系列湖泊中生物及其环境的操纵,促进一些对湖泊使用者有益的关系和结果,即藻类特别是蓝藻类的生物量的下降”^[65]。谢平认为生物操纵指以改善水质为目的的控制有机体自然种群的水生生物群落管理^[66]。生物操纵包括经典生物操纵、非经典生物操纵和罗非鱼控藻。

3.3.1 经典生物操纵

经典生物操纵,通过放养凶猛性鱼类或通过直接捕杀或毒杀的方式来控制食浮游动物鱼类,借此壮大浮游动物种群来遏制藻类繁衍生长。这种生物调控技术在营养盐管理已经失败的小型、封闭、浅水性富营养化湖泊中已显示一定的效果,且其费用低^[66~70]。但是由于研究方法、研究对象及所研究水体条件的不同,往往很难得到一致的结论与结果,因此生物调控作为管理工具的有效性仍存在很大的争议^[69]。事实上,由于湖泊生态系统的复杂性,这种多营养级的食物链管理很难使水体保持稳定的鱼类和浮游动物种群^[70,71],而且浮游动物能否摄食和利用微囊藻、颤藻和束丝藻等大型蓝藻群体尚存争议^[72]。因此,这种经典的生物操纵方法作为富营养水体水质管理工具的有效性与稳定性仍存在一定的争议,有待发展和完善。

3.3.2 非经典生物操纵

中国科学院水生生物研究所刘建康和谢平提出了非经典生物操纵法即通过控制凶猛鱼类及放养滤食性鱼类(鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*))直接觅食蓝藻水华的生物操纵^[66,73]。鲢、鳙属于典型的滤食性鱼,能直接滤食水体中浮游生物(包括各种藻类),使浮游植物数量减少和种类小型化,减轻藻类“水华”灾害。武汉东湖是我国最大的城中湖,在 1985 年之前,污染比较严重,蓝藻水华连年大面积暴发。然而在 1985 年夏,水华消失了,刘建康等认为是东湖投放的大量鲢鳙鱼类控制了蓝藻水华,并对此开展多年的研究。他们用实验湖沼学的方法先后于 1989、1990、1992 和 2000 年进行原位围隔试验,采用放养鲢鳙直接控制蓝藻水华。试验证明,在养鱼的围隔里蓝藻减少,而在不养鱼的围隔里蓝藻则生长很好。已经出现蓝藻水华的围隔,在引进鲢、鳙之后 10~20 d,水华即全部消失。每立方米水投放 46~50 g 鲢鳙,控制水华发生的效果较好。鲢、鳙的量在 1985 年达到每立方米水 50 g,东湖的水华得到控制。1985 年后,蓝藻水华再未出现^[73,74]。陆开宏等在桥墩水库先采用明矾浆等理化方法应急清除蓝藻,在快速恢复水体景观的同时,再在冬季或早春于蓝藻大量繁殖之前投放鲢、鳙等滤食性鱼类,利用鲢、鳙对蓝藻巨大的牧食压力,使蓝藻的增殖受到较大的限制,控制了蓝藻水华的再次暴发,使水体功能得以恢复^[75]。非经典生物操纵最显著的优点是具有持久性。非经典生物操纵法的核心目标定位在控制蓝藻水华,而不是治理湖泊富营养化。

3.3.3 罗非鱼控藻

罗非鱼 (*Oreochromis* spp) 和鲢、鳙不同, 兼有滤食、捕食和啮食等多种摄食方式, 能有效地摄食和利用水体中的浮游生物。陆开宏等在藻华水体月湖和一些城镇公园水体中投放罗非鱼进行控藻, 研究发现罗非鱼的牧食压力导致水体叶绿素的减少及透明度的提高, 蓝藻水华得到有效控制^[76]。但 Datta 和 Jana 在印度一人工湖的小型围隔试验发现罗非鱼只有短期的控藻效应^[77]。

由于不同水体营养盐负荷、生物组成、水动力条件的差异, 生态控制所产生的营养级联反应及下行影响也会明显不同, 为此需要我们深入研究, 根据不同情况采取相应的措施。

参考文献:

- [1] 莫婉湫, 李 策, 刘 玉, 等. 认识‘水华’[J]. 湿地科学与管理, 2009, 1(5): 62~63.
- [2] 谢 平. 论蓝藻水华的发生机制——从生物进化、生物地球和生态学视点[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [3] 陈 隽. 肝毒性微囊藻毒素在巢湖和太湖水生动物体内的生物富集及对水产品安全性的潜在威胁[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所博士学位论文, 2006.
- [4] 陆开宏. 蓝藻水华与 2 种藻食性水生动物的相互作用[D]. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 2009.
- [5] 潘晓洁. 滇池与洱海的鱼腥藻及其生态生理和毒理学研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所博士学位论文, 2008.
- [6] POURIA S, ANDRADE A, BARBOSA J, et al. Fatal microcystin intoxication in haemodialysis unit in Caruaru, Brazil[J]. Lancet, 1998, 352: 21~36.
- [7] JOCHIMSEN E M, CARMICHAEL W W, AN J S, et al. Liver failure and death after exposure to microcystins at a hemodialysis center in Brazil[J]. The New England Journal of Medicine, 1998, 338: 873~878.
- [8] CHEN J, XIE P. Tissue distributions and seasonal dynamics of the hepatotoxic microcystins-LR and -RR in two freshwater shrimps, *Palaemon modestus* and *Macrobrachium nipponensis*, from a large shallow, eutrophic lake of the subtropical China[J]. Toxicon, 2005, 45: 615~625.
- [9] CHEN J, XIE P. Seasonal dynamics of the hepatotoxic microcystins in various organs of four freshwater bivalves from the large eutrophic Lake Taihu of the subtropical China and the risk of human consumption[J]. Environmental Toxicology, 2005, 20: 572~584.
- [10] CHEN J, XIE P, GUO L G, et al. Tissue distributions and seasonal dynamics of the hepatotoxic microcystins-LR and -RR in a freshwater snail (*Bellamya aeruginosa*) from a large shallow, eutrophic lake of the subtropical China[J]. Environmental Pollution, 2005, 134: 423~430.
- [11] CHEN J, XIE P, ZHANG D W, et al. In situ studies on the bioaccumulation of microcystins in the phytoplanktivorous silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) stocked in Lake Taihu with dense toxic *Microcystis* blooms[J]. Aquaculture, 2006, 261: 1 026~1 038.
- [12] CHEN J, XIE P, ZHANG D W, et al. In situ studies on the distribution patterns and dynamics of microcystins in a bio-manipulation fish-bighead carp (*Aristichthys nobilis*) [J]. Environmental Pollution, 2007, 147: 150~157.
- [13] 谢 平. 水生动物体内的微囊藻毒素及其对人类健康的潜在威胁[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [14] 廖仁煌, 陈红萍. 龙岩梅花湖水库富营养化评价及分析[J]. 齐鲁渔业, 2009, 10: 24~25.
- [15] 冯冰冰, 王国祥, 杨文斌. 南京玄武湖污染源调查与分析[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(28): 8 963~8 964.
- [16] 李 原, 张 梅, 王若南. 滇池的水华蓝藻的时空变化[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2005, 27(3): 272~276.
- [17] 唐忠波. 蓝藻垂直迁移及沉积物氮磷释放对其浮力调节影响研究[D]. 长沙: 湖南农业大学硕士学位论文, 2008.
- [18] CHORUS I, BARTRAM J. Toxic cyanobacteria in water[M]. London: St Edmundsbury Press, 1999: 42.
- [19] 秦伯强, 杨柳燕, 陈非洲, 等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用[J]. 科学通报, 2006, 51(16): 1 857~1 866.
- [20] 郑维发, 曾昭琪. 淡水蓝藻的高温适应[J]. 湖泊学科, 1994: 356~363.
- [21] ROBARTS R D, ZOHARY T. Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming cyanobacteria[J]. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 1987, 21: 391~399.
- [22] YAMAGUCHI M, OGAWA T, MURAMOTO K, et al. Effects of culture conditions on the expression level of lectin in *Microcystis aeruginosa* (freshwater cyanobacterium) [J]. Fish Sci, 2000, 66: 665~669.
- [23] NALEWAJKO C, MURPHY T P. Effects of temperature and availability of nitrogen and phosphorus on the abundance of *Anabaena* and *Microcystis* in Lake Biwa, Japan: An experimental approach[J]. Limnology, 2001, 2: 45~48.
- [24] BOWEN C C, JENSEN T E. Blue-green algae: Fine structure of the gas vacuoles[J]. Science, 1965, 147: 1 460~1 462.
- [25] WALSBY A E. Structure and function of gas vacuoles[J]. Bacteriological Reviews, 1972, 36: 1~32.
- [26] JONE D D, JOST M. Characterization of the protein of gas-vacuoles membranes of the blue-green algae *Microcystis aeruginosa* [J]. Planta, 1971, 100: 277~287.
- [27] JANSSON M, OLSSON H, PETTERSSON K. Phosphatases: origin, characteristics and function in lakes[J]. Hydrobiologia, 1988, 170: 157~175.
- [28] 沈银武, 黎尚豪. 固氮蓝藻培养和应用的结果与展望[J]. 水生生物学报, 1993, 17(4): 357~364.
- [29] 李阔宇, 宋立荣, 万 能. 底泥中微囊藻复苏和生长特性的研究[J]. 水生生物学报, 2004, 28: 113~118.
- [30] VERSAPAGEN J M H, SNELDER E O F M, VISSER P M, et

- al. Recruitment of benthic *Microcystis* (Cyanophyceae) to the water column: internal buoyancy changes or resuspension? [J]. *Journal of Phycology*, 2004, 40: 260~270.
- [31] 孔繁翔, 高 光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. *生态学报*, 2005, 25: 589~595.
- [32] VERSPAGEN J H M, SNELDER E O F M, VISSER P M, et al. Benthic-pelagic coupling in the population dynamics of the harmful cyanobacterium *Microcystis* [J]. *Freshwater Biology*, 2005, 50: 854~867.
- [33] 戴瑾瑾, 陈德辉, 高云芳, 等. 蓝藻毒素的研究概况[J]. *武汉植物学研究*, 2009, 27(1): 90~97.
- [34] ABEI T, LAWSON T, WEYERS J D B, et al. Microcystin-LR inhibits photosynthesis of *Phaseolus vulgaris* primary leaves: Implication for current spray irrigation practice [J]. *New Phytologist*, 1996, 133: 651~658.
- [35] KURKI-HELASMO K, MERILUOTO J. Microcystin uptake inhibits growth and protein phosphatase activity in mustard (*Sinapis alba* L.) seedlings [J]. *Toxicon*, 1998, 36: 1 921~1 926.
- [36] MACELHINEY J, LAWTON L, LEIFERT C. Investigations into the inhibitory effects of microcystins on plant growth and toxicity of plant tissues following exposure [J]. *Toxicon*, 2001, 39: 1 411~1 420.
- [37] GEHRINGER M M, KEWADA V, COATES N, et al. The use of *Lepidium sativum* in a plant bioassay system for the detection of microcystin-LR [J]. *Toxicon*, 2003, 41: 871~876.
- [38] RODGER H D, TURNBULL T, EDWARDS C, et al. Cyanobacterial (blue-green algal) bloom associated with pathology in brown trout, *Salmo trutta* L., in Loch Levin, Scotland [J]. *Journal of Fish Diseases*, 1994, 17: 177~181.
- [39] ZIMBA P V, KHOO L, GAUNT P S, et al. Confirmation of catfish, *Ictalurus punctatus* (Rafinesque), mortality from *Microcystis* toxin [J]. *Journal of Fish Diseases*, 2001, 24: 41~47.
- [40] PAERL H W, FULTON R S III, MOISANDER P H, et al. Harmful freshwater algal blooms, with an emphasis on cyanobacteria [J]. *The Scientific World Journal*, 2001, 1: 76~113.
- [41] LEE T J, NAKANO K, MATSUMARA M. Ultrasonic irradiation for blue-green algae bloom control [J]. *Environmental technology*, 2001, 22: 383~390.
- [42] LU K H, JIN C H, DONG S L, et al. Feeding and control of blue-green algal blooms by tilapia (*Oreochromis Niloticus*) [J]. *Hydrobiologia*, 2006, 568: 111~120.
- [43] 和丽萍. 利用化学杀藻剂控制滇池蓝藻水华研究[J]. *云南环境科学*, 2001, 20(2): 43~44.
- [44] 李静会, 高 伟, 张 衡, 等. 除藻剂应急治理玄武湖蓝藻水华实验研究[J]. *环境污染与防治*, 2007, 29(1): 60~62.
- [45] 李雪梅, 简曙光. 有效微生物群控制富营养化湖泊蓝藻的效应[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2000, 39(1): 81~85.
- [46] 孙大朋, 张祖陆, 梁春玲. 水源富营养化及藻类控制技术[J]. *能源与环境*, 2006(3): 31~33.
- [47] 沈银武, 刘永定, 吴国樵, 等. 富营养湖泊滇池水华蓝藻的机械清除[J]. *水生生物学报*, 2004, 28(2): 131~136.
- [48] 黄 维, 裴 毅, 陈飞勇. 水体蓝藻清除的研究及其新型机械除藻初探[J]. *企业技术开发*, 2008, 27(4): 29~31.
- [49] 朱广伟. 太湖富营养化现状及原因分析[J]. *湖泊科学*, 2008, 20(1): 21~26.
- [50] 黄廷林, 柴蓓蓓. 水源水库水质污染与富营养化控制技术研究进展[J]. *地球科学进展*, 2009(6): 588~596.
- [51] 赵以军, 刘永定. 有害藻类及其微生物防治的基础——藻菌关系的研究动态[J]. *水生生物学报*, 1996, 20(2): 173~181.
- [52] 何鉴尧, 潘伟斌, 林 敏. 溶藻细菌对富营养化水体藻类群落结构的影响[J]. *环境污染与防治*, 2008, 30(11): 70~74.
- [53] 王 进. 微囊藻水华的微生物控制[D]. 南京: 南京师范大学硕士学位论文, 2005.
- [54] 裴海燕, 胡文容, 曲音波, 等. 一株溶藻细菌的分离鉴定及其溶藻特性[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(6): 796~802.
- [55] 郑小平, 谢 骏, 刘 波, 等. 一株溶藻细菌的分离鉴定及其溶藻效应初探[J]. *淮海工学院学报(自然科学版)*, 2005, 14(1): 69~71.
- [56] LEE S O, KATO J, TAKIGUCHI N, et al. Involvement of an ex-tracellular protease in Algicidal activity of the marine bacterium *Pseudoalteromonas* sp. strain A28 [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2000, 66(1): 4 334~4 339.
- [57] CARIGNAN R, KALFF J. Phosphorus sources for aquatic weeds: Water or sediments? [J]. *Science*, 1980, 207: 987~988.
- [58] 吴玉树, 余国莹. 根生沉水植物范草 (*Potamogeton crispus*) 对滇池水体的净化作用[J]. *环境科学学报*, 1991, 11(4): 411~416.
- [59] 金送笛, 李永函, 倪彩虹, 等. 范草 (*Potamogeton crispus*) 对水中氮磷的吸收及若干影响因素[J]. *生态学报*, 1994, 14(2): 168~173.
- [60] 潘继征, 李文朝, 陈开宁. 滇池东北岸生态修复区的环境效应——I. 抑藻效应[J]. *湖泊科学*, 2004, 16(2): 141~148.
- [61] 孙文浩, 俞子文, 余叔文. 城市富营养化水域的生物治理和凤眼莲抑制藻类生长的机理[J]. *环境科学学报*, 1989, 9(2): 188~195.
- [62] MULDERIJ G, VAN DONK E, ROELOFS J G M. Differential sensitivity of green algae to allelopathic substances from Chara [J]. *Hydrobiologia*, 2003, 491: 261~271.
- [63] 李锋民, 胡洪营. 大型水生植物浸出液对藻类的化感抑制作用[J]. *中国给水排水*, 2003, 12(11): 18~21.
- [64] 吴振斌, 邱东茹, 贺 锋, 等. 水生植物对富营养化水体水质净化作用研究[J]. *武汉植物学研究*, 2001, 19(4): 299~303.
- [65] 俞子文, 孙文浩. 几种高等水生植物的克藻效应[J]. *水生生物学报*, 1992, 16(1): 1~7.
- [66] 唐 萍, 吴国荣, 陆长梅, 等. 太湖水域几种高等水生植物的克藻效应[J]. *农村生态环境*, 2001, 17(3): 42~44.
- [67] SHAPIRO J, LAMARRA V, LYNCH M. Biomanipulation: An ecosystem approach to lake restoration. [M]// BREZONIK P L, FOX J L (eds). *Proceeding of a Symposium on Water*

Quality Management through Biological control. University of Florida, Gainesville, 1975; 85~89.

[68] 谢 平. 鲢、鳙与藻类水华控制[M]. 北京:科学出版社, 2003.

[69] CAIRD J M. Algae growth greatly reduced after stocking pond with fish[J]. Water Works Engineering, 1945, 98; 240.

[70] BENNDORF J. Conditions for effective biomanipulation; Conclusions derived from whole lake experiments in Europe[J]. Hydrobiologia, 1990, 200/201: 187~203.

[71] SHAPIRO J. Biomanipulation: The next phase-making it stable[J]. Hydrobiologia, 1990, 200/201: 13~27.

[72] PERROW M R, MEIJER M, DAWIDOWICZ P, et al. Biomanipulation in shallow lake; State of the art[J]. Hydrobiologia, 1997, 342/343: 355~365.

[73] HORPPILA J, PELTONEN H, MALINEN T, et al. Top-down or bottom-up effects by fish; Issues of concern in biomanipulation of lakes[J]. Restoration Ecology, 1998, 6(1): 20~28.

[74] 王国祥, 成小英, 濮培民. 湖泊藻型富营养化控制技术、理论及应用[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 273~282.

[75] 刘建康, 谢 平. 揭开武汉东湖蓝藻水华消失之谜[J]. 长江流域资源与环境, 1999, 8(3): 312~319.

[76] XIE P, LIU J K. Studies on the influence of planktivorous fishes (silver carp and bighead carp) on the phytoplankton community in a shallow eutrophic Chinese lake (Donghu Lake) using enclosure method. [R]//LIU J K (ed). Annual Report of FEBL for 1990. International Academic Publishers, Beijing, 1991: 14~24.

[77] 陆开宏, 晏维金, 苏尚安. 富营养水体治理与修复的环境生态工程——利用明矾浆和鱼类控制桥墩水库蓝藻水华[J]. 环境科学学报, 2002, 2(6): 732~737.

[78] 陆开宏, 金春华, 王杨才. 罗非鱼对蓝藻的摄食消化及对富营养化水体水华的控制[J]. 水产学报, 2005, 29(6): 811~818.

[79] DATTA S, JANA B B. Control of bloom in a tropical lake: Grazing efficiency of some herbivorous fishes[J]. Journal of Fish Biology, 1998, 53: 12~24.

PROGRESS IN CAUSES AND ECOLOGICAL CONTROL OF CYANOBACTERIAL BLOOM

HU Chuan-lin, WAN Cheng-yan, WU Sheng-gui, DING Qing-qiu, PAN Lei
(Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources & Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, China)

Abstract: In this review, the harmful effects of cyanobacterial blooms were analyzed from these areas, i. e. the balance of water ecosystems, water quality, human and other animal health risks, water ecological landscape. The causes of cyanobacterial blooms, including internal factors (a series of specific biochemical regulatory mechanisms or characteristics adapting to high temperature, three pigment systems—low-light compensation mechanism, luxury consumption mechanisms, nitrogen fixation—nutrition compensatory mechanisms, dormancy—a mechanism to avoid adverse conditions, mechanisms to suppress competitors and predators by producing toxins), environmental factors (physical factors such as temperature, light, perturbation and mixing, water residence time; chemical factors, such as major nutrients, micro nutrient elements, dissolved inorganic carbon, dissolved organic carbon and salinity) and biological factors (grazing, microorganism action and symbiosis with higher plants and animals) were analyzed. And studies on the ecological control methods of cyanobacterial blooms, such as microbiological control algae, large aquatic plants control algae and aquatic animal control algae (traditional bio-manipulation, non-traditional bio-manipulation and control of algae by tilapia) were also reviewed.

Key words: cyanobacterial bloom; causes; ecological control