

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.04.015

# 大型湖库富营养化蓝藻水华防控技术发展述评

王寿兵, 徐紫然, 张 洁

(复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433)

**摘要:** 针对大型湖库的特点, 系统分析了国内外在蓝藻水华预警、控制和应急清除等方面的各种技术发展现状、具有的优势和存在的不足, 提出了各相关技术未来发展的主要方向。认为针对富营养化水体的特征, 应因地制宜, 将多种技术优化集成, 充分发挥应急技术和长效技术、工程技术和生态技术、预警技术和管理技术各自的优势, 弥补各自的不足, 实施“适地适策”的“一湖一策”战略, 将是我国未来大型湖库蓝藻控制和富营养化治理的主要发展方向。

**关键词:** 富营养化; 蓝藻水华; 防控技术; 大型湖库

中图分类号: X524

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2016)04-0088-12

## A review of technologies for prevention and control of cyanobacteria blooms in large-scale eutrophicated lakes and reservoirs

WANG Shoubing, XU Ziran, ZHANG Jie

(Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** Based on the features of large-scale lakes and reservoirs, we systematically analyze the status, strengths, and shortages of different technologies for cyanobacteria bloom warning, control, and elimination in emergencies in China and abroad, and point out directions for related technologies in the future. We also propose the following suggestions: according to the characteristics of eutrophicated water bodies and local conditions, we should integrate and optimize various technologies, take advantage of technologies such as emergency strategies and long-term technologies, engineering and ecological technologies, and warning and management technologies, and make up for their weaknesses. The “one lake, one scheme” strategy will be a direction of development in regard to cyanobacteria blooms and eutrophication control in large-scale lakes and reservoirs of China in the future.

**Key words:** eutrophication; cyanobacteria bloom; prevention and control technology; large-scale lakes and reservoirs

自 20 世纪 80 年代以来, 富营养化水体中蓝藻水华预防、治理和应急清除技术等已受到国内外研究者的广泛关注, 各种控藻技术不断涌现, 但目前仍难以满足我国各种富营养化湖库的蓝藻水华控制需求。小型湖库主要通过加强面源截污、清除水体内部内源性营养负荷等单一方式, 在短期内能迅速控藻、改善水质, 而大中型湖库具有集水区域广、水质影响因素多、功能多样、管理复杂等特点, 需要因地制宜, 将多种技术优化集成, 发挥多种技术协同作

用, 达到长期控藻与改善水质的目的。系统梳理和分析现有蓝藻水华防控技术发展现状、存在的优缺点以及未来发展趋势, 将为进一步研发大中型湖库蓝藻水华控制技术和生态修复技术提供参考。笔者拟重点从蓝藻水华预警预报、蓝藻水华控制技术等方面展开论述。

建立健全蓝藻水华预警系统, 可为蓝藻水华防控提供强有力的技术支撑。常见技术手段包括现场巡视、实验室分析、在线监测和卫星遥感等。

现场巡视是最原始的监测方式,也是最有效最直观的监测方法。现场巡视对象主要包括气象条件、视觉特征、理化指标、生物指标、嗅觉特征等观测因子。实验室分析主要进行营养盐浓度的检测和藻类群落结构的检测。水质在线监测是一个从水样采集系统、预处理系统、在线自动分析系统、通讯系统、远程控制系统到数据监控管理系统的综合性系统,可实现水质自动监测站的在线自动运行,可利用溶解氧的日极差来进行藻类暴发的简单预警。现场巡视、实验室分析、在线监测这3种方法的优点是监测指标准确度高,但其不足之处是难以满足较大规模的湖库蓝藻水华监测需要。而卫星遥感技术具有宏观、动态、快速、大范围、周期性等显著特点,在蓝藻水华监测应用上有着不可替代的优势,既可以满足大范围蓝藻监测的需要,也可动态跟踪蓝藻水华的发生、发展情况。

我国于2013年4月底发射的高分一号小卫星,小卫星携带的高分光传感器具有2m的空间分辨率和观测幅宽(60km)的性能,有效提高了水体遥感监测的能力,而且高分一号卫星传感器的时间分辨率为4d,且基本都能稳定地传回数据,不但可满足内陆水体水质监测的时间分辨率要求,还因其具有4个可见光波段,可基本满足实际叶绿素反演的光谱波段需求。美国于2009年成功通过遥感工具和模型预测建立的有害藻华运动预报系统对墨西哥湾的短凯伦藻(*Karenia brevis*)进行了监测和预报<sup>[1]</sup>。

在遥感水华预测的实际运行中,基于遥感技术的预测预警,不但可预测蓝藻水华会不会发生(即确定未来一段时间内蓝藻水华将会暴发的概率),还可以预测蓝藻水华发生的位置或所在湖区,甚至通过模式识别方法可确定当前蓝藻水华的分布边界并进行动态监测,预测蓝藻水华在敏感湖区以及全湖的发展趋势和分布格局等,这对科学预防和确定打捞堆积的水华蓝藻的时间与地点,减轻蓝藻水华堆积腐败降解恶化水质的危害具有切实的意义。

近年来,人工神经网络技术在蓝藻水华预警方面得到了广泛的应用。Maier等<sup>[2-3]</sup>利用人工神经网络技术成功地对河流湖泊中藻华暴发的时机和程度进行了预测。Yabunaka等<sup>[4-5]</sup>利用BP-人工神经网络模型构建了日本霞浦湖、北京市长河水系的水华短期预报系统,该系统具有较高的预测精度。与此同时,通过对水体中的藻类进行生态数学模拟建立模型,是对藻华暴发的时机和地点进行预测并研究藻类种群动态的重要工具。Lilover等<sup>[6]</sup>利用模糊逻辑模型较好地预测了芬兰湾中有毒蓝藻暴发时的最大生物量。Reynolds等<sup>[7-8]</sup>提出可以模拟湖泊和水库中浮游植物

种群变化动态的PROTECH模型(Phytoplankton responses to environmental change),该模型目前已成功应用于100多个藻类种属群落中的优势种群预测<sup>[9]</sup>,并且经过不断发展和改进,已在世界范围广泛应用<sup>[10-12]</sup>。

利用遥感和地理信息技术在宏观、动态、快速、大范围、周期性监测和识别等方面的显著特点,同时结合现场巡视、实验室分析和在线监测结果等进行核实和最终判定,无疑是未来大中型湖泊蓝藻水华预警和时空动态跟踪技术的主要发展方向。

## 1 蓝藻水华控制技术

虽然目前控藻技术迅速发展,新兴的控制蓝藻的方法不断出现,许多物理技术、化学技术和生物技术得到广泛研究,每种技术也都各有其优势,但在大水域蓝藻水华控制领域常常存在一些不足,因此还没有哪种方法被广泛应用到大型湖库中。

### 1.1 物理除藻法

常用的物理除藻法主要有机械除藻、气浮除藻、过滤除藻、遮光除藻、超声波除藻和黏土除藻等。物理除藻法可以直接去除水中的蓝藻,降低水体中蓝藻生物量,目前在我国湖泊蓝藻治理中得到了广泛应用。采用物理除藻法能够及时直接除藻以应对短期内藻类的暴发,但这种方法处理范围及能力受限制,需消耗大量的人力物力来快速缓解富藻水体的负荷,但无法从根本上解决水体富营养化及藻类周期性暴发等问题,所以只能在局部水体中应用。

#### 1.1.1 机械除藻

由于蓝藻具有垂直分布和水平漂移的特性,并受热分层、光照强度、风速和风向的直接影响,蓝藻水华在这些因子的共同作用下会在湖泊表面聚集或者漂移至固定区域,如风浪小时,微囊藻会在水体表面聚集并向风向漂移,在湖边沿岸处堆积,此时利用固定收藻设备和人工打捞等方式进行机械除藻。在蓝藻暴发的季节采用人工和机械物理方式直接从湖内将蓝藻打捞出来,这是目前国内湖泊治理中投入大量人力和物力的主要方法。我国机械除藻技术研究始于20世纪90年代末,中国船舶重工集团七〇二所在“九五”期间研发制造了一艘从收集到分离、浓缩功能配套的“太湖一号”蓝藻打捞原理样船。2007年后,针对太湖蓝藻暴发,先后开发了16种不同类型的蓝藻打捞船及12种配套辅助打捞设备,初步实现了太湖蓝藻打捞由人工打捞向机械打捞的转变。熊鸿斌等<sup>[13]</sup>针对巢湖蓝藻水华通过采用浮式围栏导流并结合机械打捞的方法,取得了良好的控制水华清除蓝藻的效果。此外,国内其他单

位也开发了一些专用捞藻设备样机,但不是停留在实验室、原理样机阶段,就是设备无法满足大规模、水源地使用等特殊要求。此外,机械除藻方法仅在蓝藻暴发后发挥作用,并且必须在蓝藻大量堆积的区域进行打捞才能有较高的效率,对湖泊蓝藻水华的根治和生态修复作用有限。当风向发生变化或者风速过大时,蓝藻会随着主导风向漂移,而且表层聚集的蓝藻也会重新下沉,此时再使用机械除藻方式,就存在效率低、能耗高、水陆转运困难等不足<sup>[14]</sup>。国内外水华蓝藻应急清除技术的发展趋势是机械化打捞,而提高打捞装备技术水平、提高打捞作业效率、降低能耗等是机械化打捞技术发展的根本要求。

### 1.1.2 过滤除藻

在20世纪60~70年代,直接过滤除藻已经普遍应用于含藻水的处理。当湖泊藻细胞密度和水浊度较低时,通常可以直接使用过滤除藻的方法。当藻密度较高时,富藻水容易穿透滤床,所以过滤前高密度的富藻水需要投加杀藻剂或者絮凝剂等来改变絮凝体的表面性能,直接过滤方法只适用于对水质要求不高的水处理。近年来新的工艺不断涌现,薛罡等<sup>[15]</sup>报道了微絮凝与涤纶高弹丝纤维球相结合的过滤除藻工艺,对藻类初始浓度在 $6.8 \times 10^6 \sim 8.0 \times 10^6$  cell/L的富藻水除藻率可达90%以上。通过利用独特设计的3层滤料滤池除藻的德国Wahnback除磷厂发现该滤池直接过滤除藻效率可高达99.9%。

### 1.1.3 气浮除藻

气浮除藻法是通过实现固液分离从而去除藻类的方法。蓝藻种类一般个体较小,其絮体不易下沉。气浮除藻就是利用藻类的这一特性使得藻类絮体上浮至水体表面,达到藻类絮体与水分离的技术。Teixeira等<sup>[16]</sup>研究发现,压力溶气气浮法更容易去除单细胞的铜绿微囊藻,去除率达到93%~98%,而且能够确保只有很少一部分(8%~15%)的藻毒素排放进入水体。宫磊等<sup>[17]</sup>利用气浮设备和组合絮凝剂处理滇池藻类,使藻类去除率达99%。梁恒等<sup>[18]</sup>比较预氯化沉淀工艺、预臭氧化气浮工艺、单独气浮工艺和PPC预氧化气浮工艺对富藻水的净化效果,发现后3种工艺流程的除藻率均在80%以上,比预氯化沉淀工艺的除藻率分别提高了30%、27%和31%。气浮法通过利用气泡将絮凝颗粒托起,所以絮凝颗粒越重越不容易浮起,因此气浮法不适用于含砂杂质多的高浊度水。气浮法除藻技术具有原水适应性强,停留时间短,节约混凝剂等多方面的优点,但经气浮池排出的较高有机浓度藻渣的处理却是有待解决的问题。

### 1.1.4 超声波除藻

超声波除藻是近几年来新兴的绿色环保除藻方法。超声波除藻法是利用超声波的机械振动、声流和空化效应,通过破坏藻类细胞壁直接除藻和抑制藻类细胞生长两种方式来控制污水中的蓝藻生物量。Hao等<sup>[19]</sup>研究发现在1.7 MHz超声5 min后蓝藻去除率达到63%,且超声波处理后,蓝藻细胞内伪空胞破裂,细胞下沉,进而影响藻类的光合速率、增大底栖动物的捕食强度,进而达到减少蓝藻生物量的目的。储昭升等<sup>[20]</sup>研究发现超声波对惠氏微囊藻具有较好的抑制作用,6 d后抑制率达到68%,且超声波不会对水体中的浮游动物、沉水植物及鱼类产生显著影响。超声波除藻法在杀死蓝藻的同时抑制蓝藻生长,为控制蓝藻水华提供了一条高效的途径。

### 1.1.5 遮光除藻

20世纪90年代末,Kojima<sup>[21]</sup>在日本某水源地覆盖面积高达1 000 m<sup>2</sup>的六边形聚乙烯遮光板,遮盖约1/3水面,抑制光合作用,发现抑制藻类增殖效果显著,进而提出局部遮光控藻思路。但是,如何依据自然水体特点设计高性能低成本的大水面遮光结构,并且制定相应的施工方法成为该技术应用推广的关键。近年来美国运用的遮光产品(如Aquashade, Jet Black等)是通过络合食品或药品色素溶入水体,遮蔽藻类生长所需要的光线,抑制藻类光合作用。可以通过色素的颜色美化水景,但遮光产品需在藻类暴发之前使用。利用调控入射光的方法来控制水体藻类生长具有明显效果,但投入成本较高,对水体美观造成影响,所以遮光控藻可以作为入水口或水源地控藻的一种行之有效的技术。

### 1.1.6 黏土除藻

黏土除藻具有材料来源广、廉价、无二次污染等优点,在控制大面积藻华中很有前景,是近年来控藻技术的研究热点。Pan等<sup>[22]</sup>比较了海泡石、滑石粉、陶土、凹凸棒黏土等26种黏土对铜绿微囊藻的去除效果,发现海泡石、滑石粉、三氧化二铁和高岭石这4种黏土对铜绿微囊藻的去除效果最好,8 h去除率均在90%以上。除了直接使用黏土沉降除藻外,对黏土进行改性的技术也逐渐出现。如Liu等<sup>[23]</sup>利用十六烷基三甲基化铵改性太湖底泥,这种改性黏土对铜绿微囊藻的抑制率达到了92%。孙佩石等<sup>[24]</sup>运用黏土除藻技术治理滇池藻华,取得较好的控藻效果。邹华等<sup>[25]</sup>利用壳聚糖改性黏土治理太湖梅梁湾水域的蓝藻水华后,水体透明度从15 cm提高到了90 cm,Chl-a的去除率达到98.6%。近年来许多研究发现,由络合金属离子、有机物或杀藻

化合物所形成的改性黏土表现出了较好的除藻效果,如,潘纲等<sup>[26]</sup>通过对黏土改性,使黏土的投放量从 200 mg/L 降到了 10 mg/L,藻细胞去除率达到 95% 以上;吴春笃等<sup>[27]</sup>将壳聚糖改性的膨润土和海泡石应用于绿藻暴发的景观水体中,使浊度降至 5NTU 以下,Chl-a 的去除率达到 93% 以上。另外实验研究发现,季铵盐改性黏土对铜绿微囊藻有较好的去除效果<sup>[28]</sup>。但黏土除藻方法也会产生负面的影响,如投加的黏土引起底泥的不断累积,最终导致底泥淤积,而且投加的底泥可能对其他有益水生生物带来有害影响。黏土除藻技术主要以絮凝沉降的方式减少水体表面藻华,但是并不能完全杀死藻细胞和防止湖泊藻类的再次暴发。虽然改性黏土的除藻效果较好,但对于大面积水体,需要投入的施工成本较高,并且有可能污染底泥,所以实际运用中利用黏土除藻技术大面积治理淡水湖泊藻华的尝试少有成功。

### 1.1.7 曝气充氧

通过跌水或造流等方法增强水体流动,促进水体上下层的混合干扰温度分层,并将水面藻类驱赶至深水层,限制浮游藻类生长。DO 的增加能有效抑制底层氮磷的释放,避免水体黑臭等。对于深水水体,国内外发展了扬水筒技术。Jungo 等<sup>[29]</sup>在荷兰 Nieuwe Meer 水库长达 7 年的扬水技术应用研究表明,库内 Chl-a 质量浓度和总藻类生物量显著下降,有毒微囊藻生物量降低了 95%。国内在扬水筒技术的基础上,研发出扬水曝气技术及生物氧化组合技术等,在控藻过程中进一步改善水质,并取得较好的实践效果。马越等<sup>[30]</sup>对黑河金盆水库利用扬水筒曝气系统研究发现,藻类 Chl-a 质量浓度较 2008 年削减 53.6%。周真明等<sup>[31]</sup>发现扬水曝气与生物接触氧化组合工艺对藻类的平均去除率为 41.7%。据报道<sup>[32]</sup>,利用太阳能动力循环可以对水深大于 200 m 的水体充氧曝气,但这些扬水筒技术往往局限于水深超过 10 m 的大型湖库等深水水源地和海洋,且运行时间长,见效慢,维护成本较高。曝气既能抑制水体藻类滋生,又可通过增氧改善水体的生态环境,但曝气成本较高,且有可能造成底泥污染物的二次释放,增加水体浊度,故曝气充氧仅作为辅助处理手段。

### 1.1.8 新型物理控藻技术

除藻新技术包括 UV、超声波、微波、光催化、电解、微电解、银离子、高强磁和纳米等技术,其中有些技术已取得较好的实践效果。Hong 等<sup>[33]</sup>发现日光灯和紫外线相结合对藻类的生长具有长时间抑制作用,且太阳能 UV-C 浮动装置已用于控制东京

Kutama 湖藻类暴发<sup>[34]</sup>。依据强氧化性和还原性损伤细胞的原理,光催化和纳米技术在控藻方面也取得一定进展。如 Petter 等<sup>[35]</sup>使用汞灯和太阳光对纳米二氧化钛进行照射,发现能明显抑制藻类的生长。熊勤等<sup>[36]</sup>利用纳米布控制无锡五里湖藻华时,发现 1d 可使水体 Chl-a 质量浓度下降 76%,且该技术对斑马鱼无毒。这些新型技术虽在实验室或围隔内对藻类表现出较好控制效果,但自然水体环境因素复杂,光线和声波等衰减明显,扩大试验及对自然水体的作用效果有待检验。

## 1.2 化学除藻法

化学除藻法是直接向水体中投加化学药剂以抑制藻类生长的方法,是当前国内外使用比较广泛的一种方法。常用的化学除藻法包括化学药剂除藻法、絮凝剂除藻法及近年来新兴的在高等植物体内提取有效成分除藻的方法等。

### 1.2.1 化学药剂除藻法

能起到除藻效果的化学药剂种类繁多,大致包括金属离子杀藻剂(如硫酸铜、含铜有机螯合物等)和氧化剂(如过氧化氢、臭氧和二氧化氯等)。藻细胞表面含硫、氮和氧的官能团对金属离子有很强的亲和性,因此藻细胞可以对金属离子进行吸附。研究发现,铜、铬、镉等重金属均可以抑制藻类的生长<sup>[37]</sup>,其中,硫酸铜及含铜螯合物是最为原始的化学除藻物质。微量的铜离子是藻类生长必需的元素,而高浓度的铜离子可以通过改变超氧化物歧化酶的活性<sup>[37]</sup>、蛋白质的组成<sup>[38]</sup>、Chl-a 的光合活性<sup>[39]</sup>等方式影响藻类正常生长,并且破坏细胞完整性,致使藻毒素排放入水体<sup>[40]</sup>。氧化剂除藻是应用比较广泛的一种除藻方法。常见的除藻氧化剂包括过氧化氢、臭氧、二氧化氯和高锰酸钾等。浓度为 0.5 mmol/L 的过氧化氢可以使铜绿微囊藻的生物量从  $7.3 \times 10^6$  cell/mL 下降到  $0.4 \times 10^6$  cell/L,过氧化氢可以破坏细胞完整性,降低光合作用过程中电子传递速率,进而抑制藻类生长<sup>[40]</sup>。过氧化氢除藻被认为是一种无毒低害的除藻方式,但由于过氧化氢自身容易氧化分解导致除藻效果下降,所以过氧化氢一般只能用于短时间内除藻。臭氧是一种强氧化剂,具有很强的杀藻能力,可以破坏藻细胞的完整性。同时臭氧可以与  $\text{—C=C—}$  双键反应,使有机分子变小、极性增强,在有效去除藻类的同时去除藻毒素。臭氧是一种最佳的除藻氧化剂,但由于生产成本高,限制了其大规模的推广。二氧化氯是一种常见的消毒剂,因为其强氧化的特性,也被应用于藻华的控制。二氧化氯可以降低藻细胞体内 Chl-a、DNA 和蛋白质等的含量,进而影响藻类生长<sup>[41]</sup>。赵德骏

等<sup>[42]</sup>实验发现二氧化氯去除铜绿微囊藻时,最佳反应时间为 10 min,并且二氧化氯与混凝剂可以协同去除蓝藻,当二氧化氯和聚合氯化铝的投加量分别为 0.5 mg/L 和 10 mg/L 时,铜绿微囊藻的去除率可达 96%。二氧化氯在除藻的过程中还可以去除霉味和鱼腥味,但其生产成本低,使用过程会产生对人体有害的亚氯酸盐等物质,这也限制了二氧化氯的使用。

### 1.2.2 絮凝剂除藻法

近年来研究高效、低成本及无二次污染的环境友好型絮凝剂得到越来越多的关注。絮凝剂除藻是指利用一些具有吸附特性的天然物质如海泡石、膨润土、蒙脱石、活性炭吸附和壳聚糖等进行吸附沉淀藻类,具有天然无毒、使用方便、吸附效果明显和廉价等特点。但是包括淀粉类絮凝剂、壳聚糖类絮凝剂、纤维素类絮凝剂等在内的有机絮凝剂,成本较高,大多还处于实验室研究阶段,在湖泊水质净化中的应用十分有限。无机絮凝剂由于价格低、絮凝效果好而被广泛应用于水处理。无机絮凝剂主要包括了铁盐类和铝盐类,其中铁盐类包含聚合硫酸铁(PFS)、硫酸铁(FS)、氯化铁(FC)、聚合氯化铝铁(PAFC)等;铝盐类包含聚合氯化铝(PAC)、硫酸铝(AS)、聚合硫酸铝(PAS)等。Aktas 等<sup>[43]</sup>比较了聚合硅酸(PSI)、PAC、AS 和 FC 对聚球藻的去除效果,发现这 4 种絮凝剂中,PSI 对聚球藻的去除效果最佳。20 世纪 70 年代早期,美国向威斯康星州的几个湖泊中投加铝盐,絮状氢氧化铝沉入湖底与磷离子结合形成不溶性沉淀,使磷惰化,10 年后水质出现了很大改善<sup>[44]</sup>。美国 Wachuset 水库的试验表明,当水中 pH=6.5 时,投加铝盐作为混凝剂,投加量为 10 mg/L 时,气浮池的除藻率高达 90% 以上。李镜明等<sup>[45]</sup>试验原水经加矾、加聚丙烯酰胺后,然后流入旋流反应池充分接触反应,最后经辐射流滤池处理,除藻率达到 70.5% ~ 89%。在美国 Green 湖<sup>[46]</sup>投放 181t 明矾和 76.5t 铝酸钠钝化水体营养盐,使湖水透明度由 1.9m 升至 6.1m,明显消减水体中磷浓度,抑制了藻类生长。

### 1.2.3 从高等植物内提取有效成分的方法(生物化学方法)

目前,基于天然产物或植物源的化学杀藻剂,由于选择性较强,残留期短,在蓝藻水华防治方面的应用已日益受到关注。其中,中药植物在我国分布广泛,价格低廉,绿色环保,可以作为药材直接被人类摄入,近几年来中草药对蓝藻及其他藻类的去除作用研究得到一些学者的关注。Zhou 等<sup>[47]</sup>发现黄连、苦参、槟榔、板蓝根和鱼腥草对引起赤潮的塔玛

亚历山大藻(*Alexandrium tamarense*)有很好的抑制和去除作用。Yi 等<sup>[48]</sup>比较了 40 种中草药的甲醇提取物对铜绿微囊藻的抑制作用,发现在 800 mg/L 的添加量下,丹参、石菖蒲、虎杖、黄柏和山楂的抑制作用强于其他种类。Ye 等<sup>[49]</sup>研究得出结论:黄柏和黄芩对铜绿微囊藻的去除作用好于青蒿、宽叶柑橘,并且中草药对铜绿微囊藻的去除作用好于蛋白核小球藻。Zhou 等<sup>[50]</sup>评价了 11 种中草药对水体中斑节对虾的生理毒性,最后得出秦皮、黄连、鱼腥草和槟榔是较好的除藻剂备选。这些研究表明中草药作为制备杀藻剂的备选原料之一,具有较为广泛的应用前景。

除中草药外,一些具有杀菌消毒作用的健康食物的提取物也成为研究热点,如大蒜、小麦麦麸等。Zhou 等<sup>[51]</sup>研究发现大蒜水提取物对亚历山大藻有很强抑制作用,当大蒜素质量浓度在 3.2 ~ 10.0 mg/L 时,对亚历山大藻的抑制率可以达到 93%。李藩等<sup>[52]</sup>研究发现小麦麦麸水提取液对铜绿微囊藻有较强的抑制作用,提取液使得藻细胞内 Chl-a 和类胡萝卜素降低,并能抑制光合系统电子传递。作物秸秆具有来源广泛、成本低廉、抑藻效果好、对水体影响较小等优点而备受关注。可以预见的是,源于生物、可降解、具有蓝藻专一性的化学杀藻剂,将是未来化学灭藻研发的一个重要方向。

化学除藻方法具有低(无)毒、一次性使用、成本相对较低、适用范围广、操作简便、效果显著等优点,但是大部分化学除藻剂的生物富集对整个水环境生态系统会产生一定的负面影响,如果长期投用一种除藻剂,可能使部分藻类产生一定的抗药性,还会有导致重金属富集等弊端。同时,化学制剂可能会限制水体的运用、食用和灌溉等,且药效可能受到天气和水流的影响,还有可能杀死鱼类等生物,造成有毒物质富集而危害人类健康,并且藻类死亡后藻体如不及时清理会腐烂分解释放出氮磷及其他有机物而引起二次污染,故化学除藻方法往往仅用作应急处理措施,大多用于一些特殊水域(如小型景观水体)或特殊用途(如快速灭藻)。因此,开发影响藻类繁殖生长理化因子的新型安全无毒的化学试剂,可能在抑藻除藻方面具有较好的发展前景。

### 1.3 生物控藻法

鉴于化学除藻法存在的不足,以及生态学的兴起,人们对藻类生物控制法产生了浓厚兴趣。生物控藻法利用种间竞争和捕食关系,对水体中有害藻类进行摄食、转化、降解以及转移,从而达到控制有害藻华的目的,使水生生态系统逐渐得到恢复。一般而言,生物控藻法的作用效果主要体现在蓝藻水

华暴发前。蓝藻水华暴发后,由于藻密度基数太高,增殖量太大,仅仅依靠生物控藻是不够的。生物控藻法中,研究和应用较多的是生物操纵技术(Biomanipulation)和水生植物控藻技术,而微生物控藻技术用得相对较少。

### 1.3.1 生物操纵技术

生物操纵技术是通过浮游动物、鱼类、底栖动物等水生动物对有害藻类的摄食行为来控制有害藻华的一种技术,包括经典生物操纵(traditional biomanipulation)技术和非经典生物操纵(non-traditional biomanipulation)技术。

经典生物操纵技术是Shapito等<sup>[53]</sup>1975年提出来的,即通过放养肉食性鱼类等方法去除以浮游动物为食的鱼类,保护和发展大型牧食性浮游动物,使其生物量增加和体型增大,提高其对浮游植物的摄食效率,从而降低浮游植物数量,控制其过量繁殖<sup>[54]</sup>。近几十年来,许多研究和应用实践表明,经典的生物操纵技术在控制湖泊水体浮游植物总量方面具有一定效果,但其许多的不足也逐渐为人们所认识,如,浮游动物只能控制小型藻类,本身难以直接利用微囊藻、颤藻和束丝藻等大型蓝藻群体<sup>[55]</sup>。同时,伴随着大量大型肉食性浮游动物的出现,水中植食性浮游动物如轮虫、小型枝角类等会遭到高强度攻击,数量显著下降,反而会减小对浮游植物的捕食能力,浮游植物可能出现反弹性大量增长的现象<sup>[55]</sup>。另外,对我国大型浅水湖泊而言,浮游动物对浮游植物摄食能力一般不大,因此,还难以见到单独应用经典生物操纵成功的例子。

随着人们对经典生物操纵技术在蓝藻水华控制方面的不足和对鲢鳙等滤食性鱼类在控藻效率上的认识逐步深入,目前以投放鲢鳙等滤食性鱼类来控制蓝藻的非经典生物操纵技术已受到广泛研究和应用<sup>[55-59]</sup>。早在1975年,Kajak等<sup>[60]</sup>在波兰Warniak湖中就开展了放养鲢的控藻实验,结果发现可大大减少浮游植物总生物量和蓝藻比例。在国内,非经典生物操纵技术的研究和应用则是1980年代中后期从探索武汉东湖水华消失之谜开始逐渐发展起来的<sup>[54,61]</sup>。许多实验结果表明,在特定实验条件下,当鲢鳙等滤食性鱼类达到阈值密度时,对蓝藻等大型藻类或群体确有较好的控制作用。但同时也有许多实验发现,该技术在其他浮游藻类的控制和水体营养盐循环方面存在一些不足。由于鲢鱼鳃耙间距为20~25 μm,一般滤食30 μm以上的大型浮游植物、小型浮游植物群体以及一部分浮游动物;而鳙鱼则主要滤食大型轮虫、枝角类、桡足类等浮游动物,因此,鲢鳙对非群体的微小浮游植物不但无法滤食,

反而会因为减少了大型藻类的竞争和浮游动物的摄食而促进小型藻类的发展,致使水体浮游植物总生物量难以减少,有的甚至还会增加,不利于水质改善<sup>[62-66]</sup>。另外,尽管鲢、鳙能够通过摄食方式有效摄食蓝藻水华,但由于多数组成水华的蓝藻细胞具有较厚的公共或个体衣鞘,鲢、鳙对水华蓝藻(微囊藻)的消化利用率很低,一般只有25%~30%。浮性的鲢、鳙粪便中往往还存在着大量未消化的具有生命力的蓝藻<sup>[67]</sup>,这些蓝藻细胞回到水体后还能继续繁殖,甚至由于超补偿生长,其光合及生长活性在短期恢复并显著增强,有潜在加速水体富营养化的可能。除此之外,滤食性鱼类还可能存在“鱼类富营养化(ichthyoeutrophication)”现象,加速系统中营养物的再生,加之小型藻类较大型藻类更易吸收水体中的营养物质而加剧了其生物量的激增。除鱼类控藻外,近年来底栖动物控藻也得到关注。屈铭志等<sup>[68]</sup>利用铜锈环棱螺(*Bellamyia aeruginosa*)控制蓝藻水华,发现环棱螺通过呼吸过程摄食水中的微囊藻颗粒,使得水华短时间得到控制,改变水体中泥沙含量可以影响微囊藻团和粪便的结构,使抑制微囊藻水华的效果得到提升。

由于经典生物操纵技术和非经典生物操纵技术在单独使用时都有其各自的不足,因此,如何将经典生物操纵技术和非经典生物操纵技术进行有机整合,取长补短,从而研发出效率更高、副作用更少的蓝藻控制技术,将是未来发展的重要方向。在这方面,复旦大学研究团队已在理论和实践中进行了许多有益的尝试,并取得了成功<sup>[14]</sup>。他们采用的技术是利用风场、水体流场和蓝藻自身水平迁移规律,在蓝藻水华暴发早期,识别出大面积水体蓝藻控制的关键区域,或利用风力风向、水流方向并配合水闸等的调度制造出可设置生态陷阱的区域(该区域是蓝藻早期暴发重点区域,相对整个水域而言,面积较小,易于实行低成本人工控制),并在这些关键区域内利用水流流量调控,结合食物链控藻方法,建立蓝藻、滤食鱼类、底栖动物三者的全新动态关系模式;同时发展出水体浊度调控技术,充分发挥滤食鱼类形成泥质含藻粪便的作用,使大量蓝藻随之沉至库底而不致再度随机扩散,并被底栖动物消化、分解,最终达到有效、完全地控制蓝藻水华灾害的目的。

### 1.3.2 水生植物控藻法

除了利用水生动物控藻的生物操纵技术外,水生植物控藻法也是目前得到广泛研究并有重要应用前景的一种生物控藻法。其主要是利用水生植物与有害藻类之间对光照、营养物质、氧气等的种间竞争关系和向水环境中释放化感物质来抑制有害藻类生

长。一些水生植物不但能吸收水体中氮、磷等造成富营养化的物质;还能够分泌、释放抑制浮游藻类生长的化感物质。水生植物控藻法具有效果好、费用低、材料天然易得、不易造成二次污染等优点。目前,国内外已有关于凤眼莲、芦苇、芦竹、穗花狐尾藻、马来眼子菜、叶状眼子菜、黄丝草、轮藻、石菖蒲、金鱼藻、狐尾藻、粉绿狐尾藻、宽叶香蒲、微齿眼子菜、石龙尾、苦草、韭菜、两栖蓼、灯芯草、水浮莲、满江红、浮萍、紫萍等大量水生植物抑制有害藻类生长的研究报道<sup>[69-71]</sup>。从目前的报道来看,大多数植物释放的化感物质抑制藻类生长可能的途径主要有影响光合活性(藻类光合系统Ⅱ)、破坏细胞膜、影响细胞内某酶的活性等。

利用水生植物的化感作用控制水体中藻类生长的方式主要有3种:①将水生植物栽培至待处理水体,利用活体植物释放的化感物质抑制藻类,但水生植物的生长要具备相应的生境条件,同时注重不同水生植物的配置结构,种植技术要求较高,构建初期其稳定性脆弱,维护复杂。因此,目前越来越多的新型浮床逐渐被设计并实际运用到水体中,浮体不仅能美化水景且占地面积小。利用生态浮岛覆盖日本霞浦湖25%水面后,发现能削减94%的浮游植物<sup>[72]</sup>。但植物的吸收率和生物量成为限制浮岛净化效果的主要原因。生态浮体特别是能为微生物生长提供更多附着面以增强浮体的控藻去污能力的浮体的结构设计是技术难点之一,浮体不适合风浪较大、水流较强等水域。采用塑料、泡沫板、竹料等浮材,虽成本低,但抗风浪能力较差。还应注意浮体植物构建和收割,浮体材料发生腐烂等二次污染的问题。水生植物控藻不足之处在于,当水体富营养化程度过高时,植物难以生长存活。另外,植物生长具有季节性限制,且受植物生长周期的影响。②将植物干燥后放入待处理水体,利用其腐败释放的化感物质抑制藻类。如将大麦秸秆直接施入水体来抑制藻类,在美国等地已经有应用实例。在苏格兰一个经常暴发硅藻和蓝藻的25000 m<sup>2</sup>水域投放大麦秸秆,发现藻体生物量减少50%,富营养化现象得到了有效控制<sup>[73]</sup>。该方式操作简单,效果显著,但不足之处是难以在大型水体中使用,大规模使用时还可能影响水质和景观。③将从植物中提取的化感物质施入水体抑制藻类。不足之处是提取化感物质往往成本较高,活性持续时间不长,难以大规模使用和持续发挥作用,且高浓度化感物质的留存及其生态毒性尚需要深入研究。

由于水生植物在氮磷吸收以及为浮游动物和微生物提供栖息环境方面具有重要作用,可以起到间

接抑藻的功效,所以,可以预见的是,无论是现在还是将来,恢复水生植物群落将仍然是我国湖泊富营养化治理和生态修复的重要手段和内容。

### 1.3.3 微生物控藻法

微生物控藻法主要是溶藻微生物通过一定方式抑制藻类生长,甚至溶解藻细胞、杀死藻类。溶藻微生物是水生生态系统中生物种群构成的重要部分,主要包括:细菌(如假单胞菌、交替假单胞菌、黏细菌、弧菌、杆菌、链霉菌、纤维弧菌、欧文氏菌、鞘氨醇单胞菌等)、放线菌、噬菌体、原生动物和真菌等。已有大量研究表明,某些微生物在特定生长期能够分泌具有溶藻活性的蛋白酶、肽类化合物、氨基酸、小分子有机酸、抗生素及一些化合物等。如杨丽丽等<sup>[74]</sup>发现蜡状芽孢杆菌(*Bacillus cereus*)可以释放出一种破坏水华鱼腥藻细胞壁的活性物质。还有一些细菌是通过寄生在藻细胞上,最终导致藻细胞裂解。如蛭弧菌(*Bdellovibrio bacteriosus*)通过外鞘表毛攻击席藻(*Phormidium*)致使其破裂死亡<sup>[75]</sup>。另在包括蓝藻在内的许多藻类中,发现它们产生的部分化合物有溶藻活性<sup>[76-77]</sup>。除此之外,还发现了专门以蓝藻为寄主的浮游病毒类群噬藻体(*Cyanophage*),因其能特异性地感染蓝藻而具有重要的生态地位,是蓝藻“水华”潜在的控制因子<sup>[78]</sup>。同时研究发现一些细菌可通过与藻类直接接触溶藻,如Yan等<sup>[79]</sup>分离出一株细菌,该细菌可以通过内吞作用捕食铜绿微囊藻。在澳大利亚Moreton湾发现一种噬藻体可导致鞘丝藻水华崩溃<sup>[80]</sup>。基于这些现象与理论,人们致力于微生物控制藻类水华的研究,如美国推出Spectrum, Devour, Precise Pond等微生物菌剂、酶制剂及酶菌混合剂等产品。吕乐等<sup>[81]</sup>向围隔水体投加环境有效微生物菌剂使蓝藻生物量减少55%以上,并降低水体氨氮、亚硝酸氮、总氮和磷酸盐浓度等。另外还有复合酶激活剂,用来激活水体底栖微生物,加速对水体污染物的吸收和代谢,达到去除营养盐和控制藻类大量增殖的目的。虽然许多溶藻微生物具有溶藻效果好、易于繁殖和寄主特异性强等优点,但由于自然环境中微生物和酶制剂效果的发挥常受到地域、温度、pH值、盐度、水压、菌藻数量比、水体流动性、开放性等众多环境因素影响,并且微生物的投放还可能带来投放区生物入侵、微生物群落失调、藻类病毒扩散或生态结构破坏等危险,此外,对应于大水面等开放性流动水体,其长期效果还有待深入研究。故目前大多停留在实验室基础研究和围隔实验层面。利用微生物溶藻特性开展工程应用,尤其是在大中型湖泊中的工程应用尚未见到成功的案例。

生物法控藻很好地利用了自然界生态规律,合理开展生态工程,能够有效控制藻类的繁衍,调整新的水生态平衡。然而,能够有效控制藻类的水生动植物都受到自身生长条件的限制,生物技术存在着地域差异,且受气候等自然条件的影响,因此,根据不同的气候环境,合理开发因地制宜的生物技术和生态工程是今后研究方向之一。

## 2 小结与展望

a. 在蓝藻大规模暴发前,利用经典生物操纵和非经典生物操纵技术相结合的复合生态控制技术,将是未来蓝藻预防和富营养化治理的主要方向;而蓝藻暴发之后,则需采用高效率的机械打捞除藻,为后续的生物控藻创造条件。

b. 单一的控藻技术尽管都能在一定程度上发挥作用,但都各有其不足,从而限制了其工程应用范围和效果。

c. 针对小水域、低污染和短期控藻目标的成功案例相对较多,而针对大中型富营养化水域和长期目标的成功案例还十分少见。

d. 不同的水体因其水质、水文、生物群落本底和所在区域气候条件不同,即使采用类似的技术,在具体操作上也需不同的手段,没有一种技术可以“包打天下”。

由此可见,针对富营养化水体的特征,因地制宜,将多种技术优化集成,发挥协同作用是较好的长期控藻与改善水质的途径。以清除水体过多内源营养盐为主,充分发挥控藻集成技术和长效技术、工程技术和生态技术、预警技术和管理技术各自的优势,加强外源截污,面源有效控制,采取环境综合措施,实施“适地适策”的“一湖一策”战略,将是我国未来湖泊蓝藻治理控制的主要发展方向。

### 参考文献:

[ 1 ] NOAA. Algal Bloom Forecasting System [ EB/OL ]. [ 2009-06-02 ]. <http://tidesandcurrents.noaa.gov/hab/>.

[ 2 ] MAIER H R, DANDY G C. Modelling cyanobacteria (blue-green algae) in the River Murray using artificial neural networks [ J ]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 1997, 43 ( 3 ): 377-386.

[ 3 ] WEI B, SUGIURA N, MAEKAWA T. Use of artificial neural network in the prediction of algal blooms [ J ]. *Water Research*, 2001, 35 ( 8 ): 2022-2028.

[ 4 ] YABUNAKA K, HOSOMI M, MURAKAMI A. Novel application of a back-propagation artificial neural network model formulated to predict algal bloom [ J ]. *Water Science and Technology*, 1997, 36 ( 5 ): 89-97.

[ 5 ] 刘载文,杨斌,黄振芳,等.基于神经网络的北京市水体水华短期预报系统 [ J ]. *计算机工程与应用*, 2007, 43 ( 28 ): 243-245. ( LIU Zaiwen, YANG Bin, HUANG Zhenfang, et al. Water-bloom short-time predicting system of Beijing based on neural network [ J ]. *Computer Engineering and Applications*, 2007, 43 ( 28 ): 243-245. ( in Chinese ) )

[ 6 ] LILOVER M J, LAANEMETS J. A simple tool for the early prediction of the cyanobacteria nodularia spumigena bloom biomass in the Gulf of Finland [ J ]. *Oceanologia*, 2006, 48 ( S ): 213-229.

[ 7 ] REYNOLDS C S, IRISH A E. Modelling phytoplankton dynamics in lakes and reservoirs: the problem of insitu growth rates [ J ]. *Hydrobiologia*, 1997, 349 ( 1 ): 5-17.

[ 8 ] REYNOLDS C S, IRISH A E, ELLIOTT J A. The ecological basis for simulating phytoplankton responses to environmental change ( PROTECH ) [ J ]. *Ecological Modelling*, 2001, 140 ( 3 ): 271-291.

[ 9 ] ELLIOTT J A, REYNOLDS C S, IRISH A E. An investigation of dominance in phytoplankton using the PROTECH model [ J ]. *Freshwater Biology*, 2001, 46 ( 1 ): 99-108.

[ 10 ] LEWIS D M, ELLIOTT J A, LAMBERT M F, et al. The simulation of an Australian reservoir using a phytoplankton community model: PROTECH [ J ]. *Ecological Modelling*, 2002, 150 ( 1-2 ): 107-116.

[ 11 ] LEWIS D M, ELLIOTT J A, BROOKES J D, et al. Modelling the effects of artificial mixing and copper sulphate dosing on phytoplankton in an Australian reservoir [ J ]. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 2003, 8 ( 1 ): 31-40.

[ 12 ] ELLIOTT J A, THAEKERAY S J. The simulation of phytoplankton in shallow and deep lakes using PROTECH [ J ]. *Ecological Modelling*, 2004, 178 ( 3/4 ): 357-369.

[ 13 ] 熊鸿斌,李耀耀,张强.巢湖蓝藻的机械清除工艺以及藻水分离实验研究 [ J ]. *环境工程学报*, 2014, 8 ( 2 ): 599-604. ( XIONG Hongbin, LI Yaoyao, ZHANG Qiang. Mechanical removal and dewatering of cyanobacteria blooms in Chaohu Lake [ J ]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8 ( 2 ): 599-604. ( in Chinese ) )

[ 14 ] 任文伟,屈铭志,屈云芳,等.蓝藻水华生态防治新理论与新技术 [ M ]. 上海:上海科技教育出版社,2012.

[ 15 ] 薛罡,马钟瑛,孟幼平,等.微絮凝/涤纶高弹丝纤维球过滤工艺除藻试验研究 [ J ]. *中国给水排水*, 2009, 25 ( 7 ): 52-54. ( XUE Gang, MA Zhongying, MENG Youping, et al. Study on algae removal by micro-flocculation and high stretch yarn terylene fiber ball filtration [ J ]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25 ( 7 ): 52-54. ( in Chinese ) )

[ 16 ] TEIXEIRA M R, ROSA M J. Comparing dissolved air



- flotation and conventional sedimentation to remove cyanobacterial cells of microcystis aeruginosa Part 1: the key operating conditions [J]. Separation and Purification Technology, 2006, 52(1): 84-94.
- [17] 宫磊, 徐晓军, 魏在山, 等. 小型 CAF 气浮设备处理滇池含藻水的试验研究 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(2): 88-91. (GONG Lei, XU Xiaojun, WEI Zaishan, et al. Study on water with alga of Dianchi Lake treated by CAF equipment [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2005, 6(2): 88-91. (in Chinese))
- [18] 梁恒, 李圭白, 李星, 等. 不同水处理工艺流程对除藻效果的影响 [J]. 中国给水排水, 2005, 21(3): 5-7. (LIANG Heng, LI Guibai, LI Xing, et al. Effect of water treatment process selection on algae removal efficiency [J]. China Water & Wastewater 2005, 21(3): 5-7. (in Chinese))
- [19] HAO Hongwei, WU Minsheng, CHEN Yifang, et al. Cyanobacterial bloom control by ultrasonic irradiation at 20 kHz and 1.7 MHz [J]. Journal of Environmental Science and Health Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering, 2004, 39(6): 1435-1446.
- [20] 储昭升, 庞燕, 郑朔芳, 等. 超声波控藻及对水生生态安全的影响 [J]. 环境科学学报, 2008, 28(7): 1335-1339. (CHU Zhaosheng, PANG Yan, ZHENG Shuofang, et al. Algal control by ultrasonic radiation and its risks to the aquatic environment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(7): 1335-1339. (in Chinese))
- [21] KOJIMA S. Corroborating study on algal control by partial shading of lake surface [J]. Raw Waste Water, 2000, 42(5): 5-12.
- [22] PAN Gang, ZHANG Mingming, CHEN Hao, et al. Removal of cyanobacterial blooms in Taihu Lake using local soils; I. equilibrium and kinetic screening on the flocculation of microcystis aeruginosa using commercially available clays and minerals [J]. Environmental Pollution, 2006, 141(2): 195-200.
- [23] LIU Guofeng, FAN Chengxin, ZHONG Jicheng, et al. Using hexadecyl trimethyl ammonium bromide (CTAB) modified clays to clean the Microcystis aeruginosa blooms in Lake Taihu, China [J]. Harmful Algae, 2010, 9(4): 413-418.
- [24] 孙佩石, 许晓毅, 毕晓伊, 等. 滇池水体除藻材料的除藻作用试验研究 [J]. 安全与环境学报, 2004, 4(6): 3-6. (SUN Peishi, XU Xiaoyi, BI Xiaoyi, et al. Experimental research on algae-removing effect of Dianchi Lake by algacide material [J]. Journal of Safety and Environment, 2004, 4(6): 3-6. (in Chinese))
- [25] 邹华, 潘纲, 阮文权. 壳聚糖改性黏土絮凝除藻的机理探讨 [J]. 环境科学与技术, 2007, 30(5): 8-9, 13 (ZOU Hua, PAN Gang, RUAN Wenquan. Mechanism of flocculation and removal of microcystis aeruginosa by chitosan-modified clays [J]. Environmental Science and Technology, 2007, 30(5): 8-9, 13. (in Chinese))
- [26] 潘纲, 张明明, 闫海, 等. 黏土絮凝沉降铜绿微囊藻的动力学及其作用机理 [J]. 环境科学, 2003, 24(5): 1-10. (PAN Gang, ZHANG Mingming, YAN Hai, et al. Kinetics and mechanism of removing Microcystis aeruginosa using clay flocculation [J]. Environmental Science, 2003, 24(5): 1-10. (in Chinese))
- [27] 吴春笃, 侯纯莉, 杨峰, 等. 海泡石、膨润土改性壳聚糖对景观水絮凝效果的研究 [J]. 生态环境, 2008, 17(1): 50-54. (WU Chundu, HOU Chunli, YANG Feng, et al. Flocculation effect of sepiolite and bentonite modified chitosan on landscape water [J]. Ecology and Environment, 2008, 17(1): 50-54. (in Chinese))
- [28] 樊平, 杨维东, 李宏业, 等. 季铵盐改性黏土对铜绿微囊藻的去除研究 [J]. 环境科学与技术, 2011, 34(11): 91-94. (FAN Ping, YANG Weidong, LI Hongye, et al. Removal of microcystis aeruginosa by modified clay with quaternary ammonium surfactant [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(11): 91-94. (in Chinese))
- [29] JUNGO E, VISSER P M, STROOM J, et al. Artificial mixing to reduce growth of the blue-green alga microcystis in Lake Nieuwe Meer, Amsterdam: an evaluation of 7 years of experience [J]. Water Science and Technology: Water Supply, 2001, 1(1): 17-23.
- [30] 马越, 黄廷林, 丛海兵, 等. 扬水曝气技术在河道型深水水库水质原位修复中的应用 [J]. 给水排水, 2012, 38(4): 7-13. (MA Yue, HUANG Tinglin, CONG Haibing, et al. Application of the technology of water-lifting and aeration on water quality in-situ restoration in a deep channel reservoir [J]. Water & Wastewater Engineering, 2012, 38(4): 7-12. (in Chinese))
- [31] 周真明, 黄廷林, 丛海兵. 扬水曝气/生物接触氧化工艺除藻效果研究 [J]. 中国给水排水, 2007, 23(15): 13-16. (ZHOU Zhenming, HUANG Tinglin, CONG Haibing. Algae removal effect by combined process of water-lifting aeration and biological contact oxidation [J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(15): 13-16. (in Chinese))
- [32] HUDNELL H K, JONES C, LABISI B, et al. Freshwater harmful algal bloom (FHAB) suppression with solar powered circulation (SPC) [J]. Harmful Algae, 2010, 9(2): 208-217.
- [33] HONG J, OTAKI M. Association of photosynthesis and photocatalytic inhibition of algal growth by TiO<sub>2</sub> [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2006, 101(2): 185-189.
- [34] ALAM M Z B, OTAKI M, FURUMAI H, et al. Direct and indirect inactivation of microcystis aeruginosa by UV-Radiation [J]. Water Research, 2001, 35(4): 1008-1014.

- [35] PELLER J R, WHITMAN R L, GRIFFITH S, et al. TiO<sub>2</sub> as a photocatalyst for control of the aquatic invasive alga, cladophora, under natural and artificial light [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A-Chemistry*, 2007, 186(2): 212-217.
- [36] 熊勤, 刘治华, 张一卉, 等. 纳米杀藻布杀藻效果研究 [J]. *环境科学*, 2006, 27(4): 715-719. (XIONG Qin, LIU Zhihua, ZHANG Yihui, et al. Algaecidal effect of a Nanomaterial sheet [J]. *Environmental Science*, 2006, 27(4): 715-719. (in Chinese))
- [37] OKAMOTO O K, COLEPICOLO P. Response of superoxide dismutase to pollutant metal stress in the marine dinoflagellate *gonyaulax polyedra* [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology C-Toxicology & Pharmacology*, 1998, 119(1): 67-73.
- [38] YRUELA I, ALFONSO M, BARON M, et al. Copper effect on the protein composition of photosystem II [J]. *Physiologia Plantarum*, 2000, 110(4): 551-557.
- [39] ZHOU Shiqing, SHAO Yisheng, GAO Naiyun, et al. Effects of different algaecides on the photosynthetic capacity, cell integrity and microcystin-LR release of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 463/464: 111-119.
- [40] MCKNIGHT D M, CHISHOLM S W, HARLEMAN D. CuSO<sub>4</sub> treatment of nuisance algal blooms in drinking water reservoirs [J]. *Environmental Management*. 1983, 7(4): 311-320.
- [41] 刘洁生, 杨维东, 张珩, 等. 二氧化氯对球形棕囊藻叶绿素 a、蛋白质、DNA 含量的影响 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2006, 14(5): 427-432. (LIU Jiesheng, YANG Weidong, ZHANG Heng, et al. Effects of chlorine dioxide on contents of chlorophyll a, proteins and DNA in *phaeocystis globosa* [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2006, 14(5): 427-432. (in Chinese))
- [42] 赵德骏, 李绍秀, 夏文琴, 等. 二氧化氯杀灭水中铜绿微囊藻的影响因素 [J]. *净水技术*, 2013, (1): 6-9, 33. (ZHAO Dejun, LI Shaoxiu, XIA Wenqin, et al. Influencing factors of killing *Microcystis aeruginosa* in water with chlorine dioxide [J]. *Water Purification Technology*, 2013, (1): 6-9, 33. (in Chinese))
- [43] AKTAS T S, TAKEDA F, MARUO C, et al. Comparison of four kinds of coagulants for the removal of picophytoplankton [J]. *Desalination and Water Treatment*. 2013, 51(16-18): 3547-3557.
- [44] 郭培章, 宋群. 中外水体富营养化治理案例研究 [M]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [45] 李镜明, 梁心国, 徐和平. 辐射流滤池直接过滤处理含藻湖水的试验研究 [J]. *给水排水*, 1992, 75(1): 5-8. (LI Jingming, LIANG Xinguo, XU Heping. Experimental investigation on the direct filtration of lake water containing algae in a radial flow filter [J]. *Water Supply & Sewerage Disposal*, 1992, 75(1): 5-8. (in Chinese))
- [46] JACOBY J M, GIBBONS H L, STOOPS K B. Response of a shallow, polymictic lake to buffered alum treatment [J]. *Lake Reservoir Manage*, 1994, 10(2): 103-112.
- [47] ZHOU L H, ZHENG T L, WANG X, et al. Effect of five chinese traditional medicines on the biological activity of a red-tide causing alga-Alexandrium tamarense [J]. *Harmful Algae*, 2007, 6(3): 354-360.
- [48] YI Yanglei, LEI Yi, YIN Yuebang, et al. The antialgal activity of 40 medicinal plants against *microcystis aeruginosa* [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2012, 24(4): 847-856.
- [49] YE Liantao, QIAN Jiazhong, JIN Song, et al. Algicidal effects of four Chinese herb extracts on bloom-forming *microcystis aeruginosa* and *Chlorella pyrenoidosa* [J]. *Environmental Technology*, 2014, 35(9): 1150-1156.
- [50] ZHOU Lihong, CHEN Xuehao, ZHENG Tianling. Study on the ecological safety of algicides: a comprehensive strategy for their screening [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2010, 22(6): 803-811.
- [51] ZHOU L H, ZHENG T L, CHEN X H, et al. The inhibitory effects of garlic (*Allium sativum*) and diallyl trisulfide on *Alexandrium tamarense* and other harmful algal species [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2008, 20(4): 349-358.
- [52] 李藩, 李仁辉, 于晓章, 等. 小麦麸皮水浸提液对铜绿微囊藻 (*microcystis aeruginosa*) 光合色素含量和叶绿素荧光诱导动力学的影响 [J]. *湖泊科学*, 2013, 25(3): 373-377. (LI Fan, LI Renhui, YU Xiaozhang et al. Effect of wheat bran leachate on the photosynthetic pigments contents and chlorophyll fluorescence induction dynamics of *microcystis aeruginosa* [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, 25(3): 373-377. (in Chinese))
- [53] SHAPITO J, LAMARRA V, LYNCH M. Biomanipulation: an ecosystem approach to lake restoration [J]. *Proceedings of the Symposium on Water*, 1975, 21(6): 85-96.
- [54] STARLING F L R M. Control of eutrophication by silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) in the tropical Paranao Reservoir (Brasilia, Brazil): a mesocosm experiment [J]. *Hydrobiologia*, 1993, 257(3): 143-152
- [55] 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. (LIU Jiankang, XIE Ping. Unraveling the enigma of the disappearance of water bloom from the East lake (Lake Donghu) of Wuhan [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 1999, 8(3): 312-319. (in Chinese))
- [56] 谢平. 鲢、鳙与藻类水华控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [57] SMITH D W. Biological control of excessive phytoplankton growth and the enhancement of aquacultural production

- [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1985, 42(12): 1940-1945.
- [58] 李琪,李德尚,熊邦喜,等. 放养鲢鱼(*Hypophthalmichthys molitrix* C et V)对水库围隔浮游生物群落的影响[J]. 生态学报, 1993, 13(1): 30-37. (LI Qi, LI Deshang, XIONG Bangxi, et al. Influence of silver carp on plankton community in reservoir enclosures [J]. Acta Ecologica Sinica, 1993, 13(1): 30-37. (in Chinese))
- [59] DOMAIZON I, DEVAUX J. Experimental study of the impacts of silver carp on plankton communities of eutrophic Villerest reservoir (France) [J]. Aquatic Ecology, 1999, 33(2): 193-204.
- [60] KAJAK Z, RYBAK J, SLXXTNIEWSKA I, et al. Influence of the planktivorous fish, hypophthalmichthys molitrix, on the plankton and benthos of the eutrophic lake [J]. Pol. Arch. Hydrobiol., 1975, 22: 301-310.
- [61] XIE Ping, LIU Jiankang. Practical success of biomanipulation using filter-feeding fish to control cyanobacteria blooms: a synthesis of decades of research and application in a subtropical hypereutrophic lake [J]. The Scientific World Journal, 2001(1): 337-356.
- [62] LAZZARO X. A review of planktivorous fishes: their evolution, feeding behaviours, selectivities and impacts [J]. Hydrobiologia, 1987, 146(2): 97-167.
- [63] 刘焕亮. 鲢鱼、鳙鱼的滤食器官 [J]. 大连水产学院学报 [J], 1981, 6(11): 13-33. (LIU Huanliang. The filtering apparatus of silver carp and bighead carp [J]. Journal of Dalian Fisheries University, 1981, 6(11): 13-33. (in Chinese))
- [64] 王丽卿, 许莉, 陈庆江, 等. 鲢鳙放养水平对淀山湖浮游植物群落影响的围隔实验 [J]. 环境工程学报, 2011, 5(8): 1790-1794. (WANG Liqing, XU Li, CHEN Qingjiang, et al. Stocking level effects of silver and bighead carps on the phytoplankton community in enclosures in Dianshan Lake [J]. Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(8): 1790-1794. (in Chinese))
- [65] SOSNOVSKAYA A, QUIRO R. Effects of fish manipulation on the plankton community in small hypertrophic lakes from the Pampa Plain (Argentina) [J]. Limnologia, 2009, 39(3): 219-229.
- [66] DRENNER R W, BACA R M. Community responses to piscivorous largemouth bass: a biomanipulation experiment [J]. Lake and Reservoir Management, 2002, 18(1): 44-51.
- [67] 陈少莲, 刘肖芳, 胡传林, 等. 论鲢、鳙对微囊藻的消化利用 [J]. 水生生物学报, 1990, 14(1): 49-59. (CHEN Shaolian, LIU Xiaofang, HU Chuanlin, et al. On the digestion and utilization of microcystis by fingerlings of silver carp and bighead [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1990, 14(1): 49-59. (in Chinese))
- [68] 屈绍志, 屈云芳, 任文伟, 等. 铜锈环棱螺控制微囊藻水华的机理研究 [J]. 复旦学报(自然科学版), 2010, 49(3): 301-308. (QU Mingzhi, QU Yunfang, REN Wenwei, et al. The mechanism of controlling microcystis bloom by *bellamya aeruginosa* [J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2010, 49(3): 301-308. (in Chinese))
- [69] 王红强, 李宝宏, 张东令, 等. 藻类的生物控制技术研究进展 [J]. 安全与环境工程, 2013, 20(5): 38-43. (WANG Hongqiang, LI Baohong, ZAHNG Dongling, et al. Research advance in biological techniques for controlling algal growth [J]. Safety and Environmental Engineering, 2013, 20(5): 38-43. (in Chinese))
- [70] 吴程, 常学秀, 董红娟, 等. 粉绿狐尾藻 (*myriophyllum aquaticum*) 对铜绿微囊藻 (*microcystis aeruginosa*) 的化感抑制效应及其生理机制 [J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2595-2602. (WU Cheng, CHANG Xuexiu, DONG Hongjuan, et al. Allelopathic inhibitory effect of *myriophyllum aquaticum* (Vell.) verde. on *microcystis aeruginosa* and its physiological mechanism [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6): 2595-2602. (in Chinese))
- [71] 陈卫民, 张清敏, 戴树桂. 苦草与铜绿微囊藻的相互化感作用 [J]. 中国环境科学, 2009(2): 147-151. (CHEN Weimin, ZHANG Qingmin, DAI Shugui. The mutual allelopathy of *vallisneria spiralis* linn. and *microcystis aeruginosa* [J]. China Environmental Science, 2009(2): 147-151. (in Chinese))
- [72] NAKAMURA K, SHIMATANI Y. The state-of-the-art of the artificial floating islands [J]. Civil Engineering Journal, 1999, 41(7): 26-31.
- [73] BARRETT P R F, LITTLEJOHN J W, CURNOW J. Long-term algal control in a reservoir using barley straw [J]. Hydrobiologia, 1999, 147: 309-313.
- [74] 杨丽丽, 潘伟斌, 李燕. 一株溶藻细菌溶藻活性物质的成分及溶藻机制 [J]. 环境科学与技术, 2010, 33(3): 72-75. (YANG Lili, PAN Weibin, LI Yan. Preliminary study on components and its algicidal mechanism of algicidal substance secreted by bacteria [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(3): 72-75. (in Chinese))
- [75] BURNHAM J, SUSAN A, DAFT M. Myxococcus predation of the cyanobacterium *phormidium luridum* in aqueous environment [J]. Archives of Microbiology, 1984, 137(3): 220-225.
- [76] 张炳火, 李汉全, 查代明, 等. 微生物源溶藻化合物研究进展 [J]. 中国抗生素杂志, 2015, 40(12): 881-892. (ZHANG Binghuo, LI Hanquan, ZHA Daiming, et al. The cyanobacteriallytic compounds from microorganism [J]. Chinese Journal of Antibiotics, 2015, 40(12): 881-892. (in Chinese))
- [77] 景澄茗, 林涵, 陈庆丽, 等. 微生物控制水华藻的研究进

展[J]. 环境保护科学, 2014, 40(6): 34-38. (JING Chengming, LIN Han, CHEN Qingli, et al. Progress in control of algae with microorganism [J]. Environmental Protection Science, 2014, 40(6): 34-38. (in Chinese))

[78] 王淼星, 向安, 魏大巧, 等. 噬藻体研究进展[J]. 生物技术, 2009, 19(6): 89-95 (WANG Miaoxing, XIANG An, WEI Daqiao, et al. Research progress of cyanophage[J]. Biotechnology, 2009, 19(6): 89-95. (in Chinese))

[79] YAN Cui, LI Jianhong, LI Jujiao, et al. A heterotrophic nanoflagellate grazing on the toxic Cyanobacterium microcystis aeruginosa [J]. International Journal of Limnology, 2009, 45(1): 23-28.

[80] 汪小雄, 姜成春, 朱佳, 等. 微生物在除藻方面的应用研

究[J]. 工业水处理, 2011, 31(2): 1-4. (WANG Xiaoxiong, JIANG Chengchun, ZHU Jia, et al. Research on the application of microbial techniques to algae removal [J]. Industrial Water Treatment, 2011, 31(2): 1-4. (in Chinese))

[81] 吕乐, 尹春华, 许倩倩, 等. 环境有效微生物菌剂治理蓝藻水华研究[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(8): 1-3. (LYU Le, YIN Chunhua, XU Qianqian, et al. Cyanobacterial bloom control by environmental effective microorganisms [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(8): 1-3. (in Chinese))

(收稿日期: 2016-04-11 编辑: 彭桃英)

(上接第 83 页)

在本模型中设为常数,但在实际情况下,降雨强度能影响  $C_M$  值的大小,降雨强度较大的时候,相应的  $C_M$  值也相应较大,降雨强度与  $C_M$  之间呈非线性关系。此外,比较表 3 和表 4 可知,泥沙模拟结果差于径流模拟结果,这是因为泥沙模拟是建立在径流模拟的基础之上的,径流模拟的误差在泥沙模拟时得到了放大,因此泥沙模拟相对误差会比径流模拟相对误差大。

### 3 结 语

将新安江模型与土壤侵蚀概念模型进行集成与融合,构建了基于网格的淮河上游泥沙负荷模拟模型,并模拟了淮河上游息县水文站以上流域的泥沙负荷变化过程。研究表明,模型参数除  $C_M$  和  $C_{GM}$  比较敏感外,其余参数皆不敏感;在率定期与验证期模型模拟的年输沙量的相对误差基本都在 20% 以内(除 2001 年以外),确定性系数基本都在 0.5 以上(除 2001 年以外),模型模拟的输沙量与实测输沙量的相关系数为 0.98,二者呈强正相关性。可见,日尺度的泥沙负荷过程模拟效果较好,可用于该地区的产沙过程模拟,也可为其他地区的产沙负荷模拟提供参考,为流域水土流失治理和科学资源开发利用提供一定的依据。

### 参考文献:

[1] NEITSCH S L, ARNOLD J G, KINIRY J R, et al. Soil and water assessment tool user's manual version 2000 [J]. GSWRL Report, 2002, 202: 22-26.

[2] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究 [J]. 地理科学进展, 2003, 22(1): 79-86. (WANG Zhonggen, LIU Changming, HUANG Youbo. Principle, structure and application of SWAT model [J].

Journal of Geographical Science, 2003, 22(1): 79-86. (in Chinese))

[3] 张玉斌, 郑粉莉, 贾媛媛. WEPP 模型概述 [J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 146-149. (ZHANG Yubin, ZHENG Fenli, JIA Yuanyuan. Summary of WEPP model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(4): 146-149. (in Chinese))

[4] 包为民. 水文预报 [M]. 3 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.

[5] 姚成. 基于栅格的分布式新安江模型构建与分析 [D]. 南京: 河海大学, 2007.

[6] 李琼芳, 谢伟, 薛运宏, 等. 新安江模型在土壤侵蚀模拟中的应用 [J]. 水电能源科学, 2010, 28(3): 11-13. (LI Qiongfang, XIE Wei, XUE Yunhong, et al. Xin' anjiang model in the application of soil erosion simulation [J]. Water Research and Power, 2010, 28(3): 11-13. (in Chinese))

[7] 包为民. 黄土地区流域泥沙模拟概念模型与应用 [M]. 南京: 河海大学出版社, 1995.

[8] BRUNASH J C, FERRAL R L, MCGUIRE A, et al. A generalized streamflow simulation system: conceptual modeling for digital computers [R]. Sacramento, CA: Joliet Federal State River Forecasts Center, 1973.

[9] 庄卫东, 汪春. 精准农业中 UTM 投影及反算应用研究 [J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2005, 17(3): 47-50. (ZHUANG Weidong, WANG Chun. Studies on the UTM projection and it's inverse calculation in the precision agriculture [J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2015, 17(3): 47-50. (in Chinese))

[10] 李毅, 邵明安, 王文焰, 等. 土壤非饱和导水率模型中参数的敏感性分析 [J]. 水科学进展, 2003, 14(5): 593-597. (LI Yi, SHAO Ming'an, WANG Wenyan, et al. Unsaturated soil hydraulic conductivity the sensitivity analysis of parameters in the model [J]. Advance in Water Science, 2003, 14(5): 593-597. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-07-09 编辑: 彭桃英)