

蓝藻水华的拦截和陷阱捕获综合控藻技术研究

李敦海¹, 汪志聪^{1,2}, 秦红杰^{1,2}, 李印霞^{1,2}, 张浪^{1,2}

(1. 中国科学院水生生物研究所, 湖北 武汉 430072; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于水文气象条件对巢湖蓝藻水华分布的影响, 在西北岸万年埠的迎风岸湖段设置蓝藻水华拦截围隔和蓝藻水华捕获陷阱。通过连续监测, 比较围隔内外蓝藻生物量和浮游植物多样性的差异, 检测水华陷阱的蓝藻捕获效率, 从而对蓝藻水华拦截和陷阱处置综合控藻技术的作用进行评估。结果表明: (1) 陷阱设置在西半湖万年埠湖段是科学合理的, 监测表明蓝藻水华生物量受风力和水流驱使主要聚集在沿岸带区域; (2) 水华拦截围隔对蓝藻水华有很好的拦截效果, 在水华暴发期间蓝藻围栏可以拦截 50% 以上的蓝藻水华和 50% 以上的 Chla 浓度, 水华拦截区围隔内的生物多样性指数显著高于拦截围栏之外的水域; (3) 陷阱对微囊藻水华的聚集捕获效果显著, 在适宜气象条件下聚集效率约为 2 kg/(m²·d)。这些研究结果说明该综合技术有很好的控藻效果, 具有良好的应用前景。

关键词: 拦截; 生物多样性; 藻华控制; 蓝藻水华; 陷阱捕获

中图分类号: X832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-8227(2012)Z2-0045-06

由于人类经济影响的加剧, 长江中下游的湖泊富营养化现象变得越来越严重, 导致多数大型浅水湖泊发生严重的水华^[1~3]。一些研究者认为, 适宜的水温、营养盐、pH 值和环境光照是导致水华快速增长的主要原因^[4,5], 并在特定的水文气象条件下成群、上浮、聚集而在半封闭式湖湾中形成表面水华^[6]。当用作娱乐和饮用的水源发生了富营养化后, 水中的蓝藻水华对生态系统和人类的健康都有着极大的危害^[7~9], 尤其是一些可产生藻毒素的蓝藻水华。

目前国内外采用的水华蓝藻去除和控制技术主要有 4 类: (1) 工程方法: 如机械收获蓝藻水华移出水体^[10,11]等, 虽然治标不治本但可以用于应急控藻; (2) 物理方法: 如超声波除藻^[12], 但能耗大且没有从根本上抑制藻的活性, 且散碎的群体在风浪搅动下再悬浮后的增殖能力更强; (3) 生物方法: 如在湖内种植高等沉水植物和挺水植物^[13,14], 但水体透明度和底质厌氧状态未改善, 成活率很低, 虽然时效长但见效慢, 受自然气候影响较大; (4) 化学方法: 例如传统的含铜杀藻剂^[15]杀藻、铁盐絮凝沉降^[16]、粘土絮凝沉降^[17,18]、石灰脱氮剂^[19]等, 但药剂用量大并易造成二次污染且透明度改善有限, 使得化学除

藻方法也难以推广。

在大型富营养湖泊水华堆积严重的湖湾内, 比较广泛使用的控藻技术主要还是对藻类生物量的机械收获。收藻船是较常用的藻类收获工具, 其利用潜水泵将富藻水吸入船体内进行脱水收集藻泥。另外, 岸基固定的蓝藻收获方法也较常见, 即在蓝藻水华容易聚集的湖湾的湖岸上建立收藻站, 对收集的富藻水利用振动斜筛和卧螺离心机等进行浓缩脱水^[10], 该技术在太湖和滇池中应用较多。上述机械收藻技术中, 如果在湖湾构建柔性漂浮围栏和陷阱, 依据湖湾中自然水体流场和风力驱动使大量蓝藻聚集于陷阱内, 可以大大提高蓝藻水华的收获效率。将收集的富藻水通过絮凝沉降处理, 清水还湖, 则可以大幅降低除藻技术的成本, 而且操作也相对简便。另外, 利用围栏可以阻挡蓝藻水华, 使湖湾内封闭区域的蓝藻水华污染大大降低, 有利于生态系统恢复。

巢湖西部是巢湖污染较严重的区域, 主要水质指标长期劣于东半湖, 水华严重暴发造成生境破坏, 湖滨带生态退化严重。在巢湖西部近岸带蓝藻水华堆积区实施导流拦截和陷阱处置, 可以为湖滨带的生态修复创造条件。

收稿日期: 2012-07-03; 修回日期: 2012-08-06

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07103-004-01)

作者简介: 李敦海(1971~), 男, 河南省新县人, 研究员, 博士, 主要从事藻类生物学、藻类环境生物学以及受损水生态系统的修复与重建研究。E-mail: lidh@ihb.ac.cn

1 材料和方法

1.1 蓝藻水华拦截围隔和陷阱处置示意图

水华拦截区和陷阱捕获区域布置如下图 1。根据现场踏勘以及对现场历年资料的分析,选在合肥市滨湖新区万年埠湖滨带建立一个蓝藻围栏,围栏采用刚性和软性双层结构;在围隔之外设置蓝藻水华捕获陷阱,并采用机械方法对进入陷阱的蓝藻生物物质进行收获处置;对少量进入围隔内以及围隔内水体自生的水华蓝藻,进行机械移动收获。在陷阱内外设置 3 个断面共 15 个采样点(如图 1),用于评估陷阱的藻类聚集效果,各个采样点的坐标经纬度如表 1 所示。

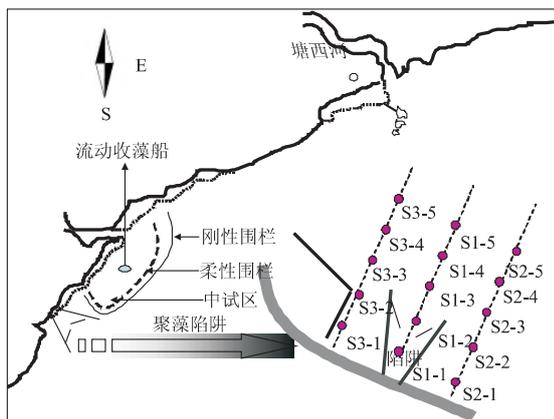


图 1 水华陷阱和拦截设置的示意图及陷阱区采样点分布图

Fig. 1 Schematic Diagram of Bloom-trap and Bloom-barrier and the Distribution of Sampling Sites

表 1 陷阱区采样分布图

Tab. 1 Distribution of Sampling Sites in Bloom-trap

样点	北纬	东经
S1-1	31°41'24.81"	117°18'8.70"
S1-2	31°41'21.21"	117°18'15.82"
S1-3	31°41'17.10"	117°18'22.17"
S1-4	31°41'13.72"	117°18'28.92"
S1-5	31°41'10.16"	117°18'36.03"
S2-1	31°41'19.00"	117°18'5.60"
S2-2	31°41'15.09"	117°18'12.70"
S2-3	31°41'11.59"	117°18'20.21"
S2-4	31°41'7.81"	117°18'26.91"
S2-5	31°41'4.41"	117°18'34.22"
S3-1	31°41'30.96"	117°18'12.22"
S3-2	31°41'27.70"	117°18'18.62"
S3-3	31°41'24.09"	117°18'25.46"
S3-4	31°41'20.67"	117°18'31.85"
S3-5	31°41'17.08"	117°18'38.80"

1.2 蓝藻拦截围栏构建示意图

拦截围隔围栏的长度为 400 m,双层设置,靠外侧为钢管桩刚性围栏,钢管桩上外挂竹排用于消浪;内侧柔性围栏为聚乙烯泡沫浮子加无纺布。柔性围栏的结构设计见图 2。柔性围隔采用防紫外无纺布制成,高 1 m。上端圆柱状聚乙烯泡沫浮体直径 30 cm,下端配以沙袋或者石龙。中间裙体部分缝制尼龙加强带,并设置绳扣,以尼龙绳固定,锚定在湖底,防止随风浪漂走。刚性围栏结构设计见图 3。以直径 48 mm,长 6.0 m 的钢管,间隔 1 m 打入湖底中 2.5 m,横向加两排同规格钢管。钢管排桩上挂竹排,高 2.5 m。

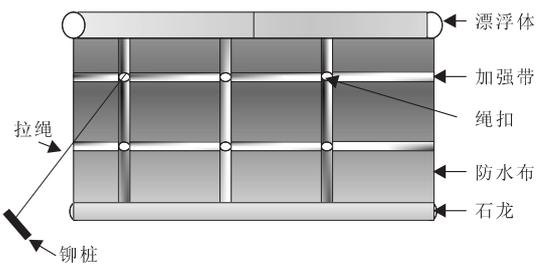


图 2 防水布软围隔围栏结构

Fig. 2 Construction Schematic Diagram of Soft-barrier Enclosure

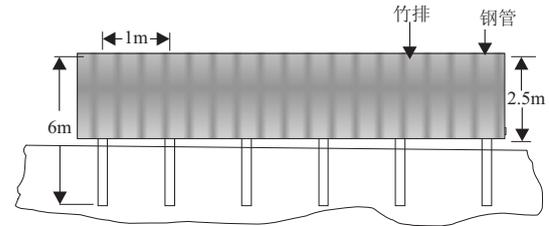


图 3 刚性围栏结构

Fig. 3 Construction Schematic Diagram of Hard-barrier Enclosure

1.3 水华陷阱的设置

蓝藻水华捕获陷阱安装结构图如下图 4。陷阱围栏材质为 PVC;陷阱围栏规格:裙摆高 50 cm,浮子直径 30 cm;总长度:260 m。安装方式:在湖底打钢筋桩,用尼龙绳固定。

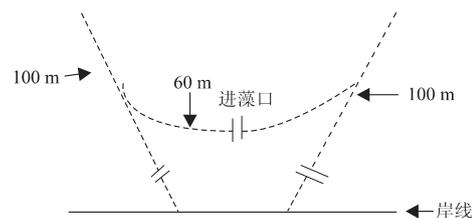


图 4 蓝藻水华捕获陷阱平面结构图

Fig. 4 Plane Structure Diagram of Bloom Capture Trap

1.4 水文理化因子测量方法

通过西巢湖蓝藻水华拦截和陷阱处置中试工程的实施,完成了藻类围栏的选材和布设,并对围栏的适用性、长效性及其效果进行研究。如对围栏内外的浮游植物、叶绿素 a、营养盐等进行采样分析,以确定围栏的拦截效果。浮游植物和叶绿素的测定分别参考使用 Wang 等^[20]和 Wang 等^[21]的方法。

2 结果与分析

2.1 陷阱区水体的水文特征和适宜捕获蓝藻水华的条件

图 5 中显示在晴天微风条件下,表层水体流速平均为 0.17 m/s,中层和下层水流相对略高,分别

为 0.17 和 0.18 m/s。表层水流速大,水表层的蓝藻水华也随波逐流地飘到西北沿岸的湖湾中,在这种气象条件下有利于水华蓝藻的聚集。而雨天和大风状态下,水体扰动强烈,呈水层垂直交换流动状态,水平流速变小(0.12~0.16 m/s),不利于蓝藻的聚集。Chla 的分布状态也反映了这种水文动态。陷阱充分发挥蓝藻捕获作用的水文气象条件是持续晴天的微风条件。

2.2 水华陷阱的控藻效果

由图 6 上可以看出在陷阱周围聚集了大量的蓝藻水华,从湖泊蓝藻分布状况来看,陷阱的聚藻效果非常显著。在晴天微风条件下,南风或东南风均可聚集大量的微囊藻水华在陷阱内部。上述适宜条件下,陷阱中收藻效率为 2 kg/(m²·d)。

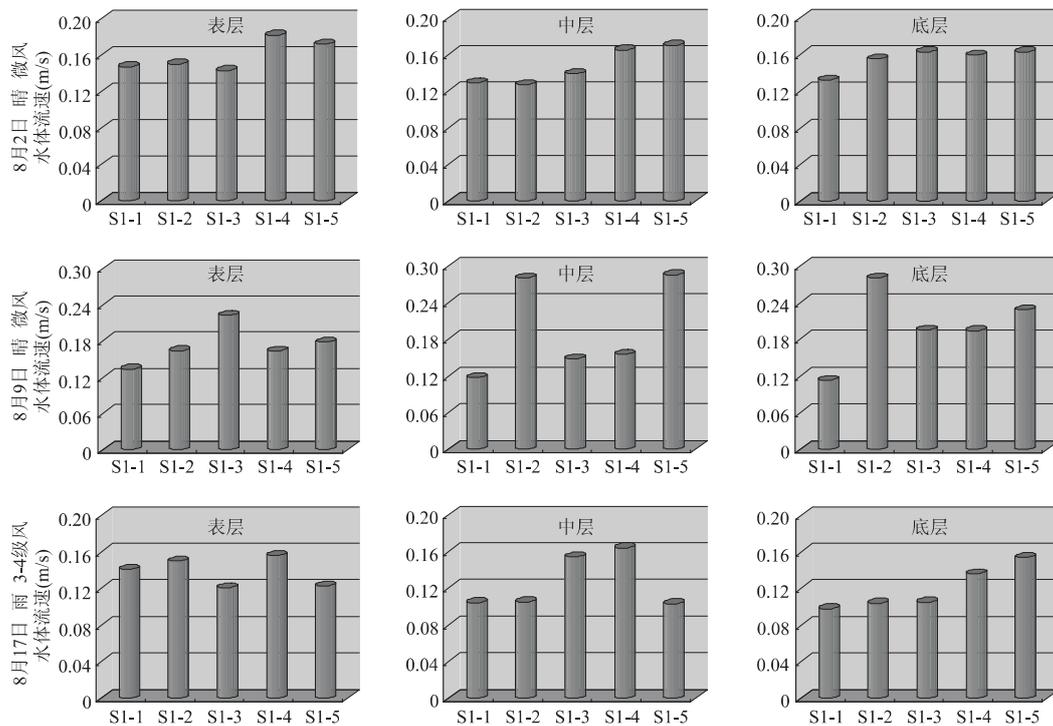


图 5 蓝藻水华陷阱区域水体流场特征

Fig. 5 Flow Field Characteristics of Water Body in the Area Around the Bloom-trap



图 6 蓝藻水华捕获陷阱对水华的聚集效果现场照片

Fig. 6 Scene Photos of the Aggregation Effects on Cyanobacterial Blooms by the Bloom-trap

2.3 水华拦截区域的生态改善效果

在巢湖西部合肥万年埠湖段完成的蓝藻水华拦截与陷阱处置技术中试工程,蓝藻拦截围栏总长近 400 m,围隔面积 4 万余 m²。在水华暴发期间蓝藻围栏可以拦截 50% 以上的蓝藻水华和 50% 以上的

Chla 浓度,使其不进入围隔。尤其是在 7 月份水华堆积最严重的时间段,围隔对蓝藻水华的拦截率达到 91%,对 Chla 的拦截率是 90.3%。水华拦截区围隔内的生物多样性显著高于拦截围栏之外的水域(见表 2)。

表 2 蓝藻水华拦截效果评估

Tab. 2 Effect Evaluation of Bloom-barrier Enclosure

	叶绿素(mg/L)				藻类群落 Shannon-weiner 指数		
	围格外	围格内	蓝藻拦截率(%)	叶绿素拦截率(%)	围格外	围格内	多样性改善率(%)
Mar-2010	0.015	0.015	0.2	0.9	3.392	3.394	0.1
Apr-2010	0.048	0.030	42.9	37.3	0.114	1.328	1 065.9
May-2010	0.262	0.113	58.5	56.7	0.569	1.162	104.1
Jun-2010	1.114	0.163	86.7	85.3	0.455	0.859	88.7
Jul-2010	2.174	0.210	91.0	90.3	0.053	0.540	915.3
Aug-2010	1.360	0.251	81.7	81.5	0.056	0.180	222.1
Sep-2010	0.848	0.114	87.1	86.5	0.023	0.714	3 058.3
Oct-2010	0.362	0.133	64.8	63.3	0.090	0.812	806.0
Nov-2010	0.194	0.094	53.8	51.8	0.602	1.656	175.0

注:叶绿素拦截率=(Chla_{围格外}-Chla_{围格内})/Chla_{围格外}×100%

蓝藻拦截率=(Chla_{围格外}×围格外蓝藻比率-Chla_{围格内}×围格内蓝藻比率)/(Chla_{围格外}×围格外蓝藻比率)×100%

3 讨论

本研究主要利用水华蓝藻具有漂浮并随波逐流的特性,选择污染湖湾迎风岸带蓝藻水华频繁大量聚集的区域,利用刚性与柔性围隔相结合,对蓝藻水华进行“拦截”和“疏导”;并模仿自然湖湾,采用软性围隔构建陷阱,对水华蓝藻进行“捕获”和“聚集”;利用蓝藻水华收集装置、潜水泵或自吸泵、振动筛等,对蓝藻水华进行“收集”和“浓缩”;利用离心机或者絮凝沉淀技术,对富藻水进行“脱水”^[10]。还可以配合使用“复合生态环保控藻剂控藻改善水质技术”^[22],将“杀藻”、“絮凝”、“沉淀”和“改善水质与底质”结合起来,在去除藻类的同时扑灭种源,提高水体透明度,改善湖泊底质,为生态恢复创造条件。通过这一系列技术的应用,最终达到对污染湖湾蓝藻水华的规模化、高效率的去除,改善水质,为湖滨带的生态修复提供保障条件。这种除藻方法不仅从生产力上直接移除了蓝藻水华,而且断裂了湖泊中营养再生循环链。削减湖泊中营养,尤其是磷营养是控制蓝藻光合活性和生长潜力的主要方法^[21,23]。“陷阱捕获水华蓝藻技术”为原创技术,并运用了“蓝藻水华拦截技术”、“蓝藻水华收获技术”以及“蓝藻水华浓缩脱水技术”等集成技术。

该技术体系中软性围隔一般采用橡胶材质,浮子直径在 30 cm 以上,围隔高度不低于 50 cm,该拦

截装置至少可以拦截 50% 的水华蓝藻;蓝藻陷阱 2 条疏导围栏长度各不少于 100 m,陷阱中拦截围栏 60 m,开口 1 m 左右。在风向朝向陷阱时,该陷阱内可捕获水华蓝藻 2 kg/(m²·d);利用“复合生态环保控藻剂控藻改善水质技术”,可以将近 100% 的蓝藻水华沉淀去除,并且 100% 的蓝藻细胞均失去活性,且在风浪搅动下,在悬浮率低于 1%,使用该技术处理富藻水,处理成本在 0.5 元/m³ 以下。

在污染严重的蓝藻水华频繁暴发的西半湖区中,收集数据并分析蓝藻水华生物量梯度分布规律以及风力、风向和水体流场对微囊藻在沿岸带分布格局的影响。结果表明大量的生物量在夏季东南风的条件下聚集于西北沿岸湖滨带,这说明了收藻区域选在万年埠沿岸较适宜。在晴天微风(<3 m/s)条件下,表层水体流速较中下层偏高,有利于水华蓝藻的聚集,而雨天和大风状态,水体扰动强烈,呈垂直对流,下层水体流速更大,蓝藻不易在水体的上表层聚集。叶绿素在各个水层的空间分布证实了这种水文动态。

在巢湖西部合肥万年埠湖段完成的蓝藻水华拦截与陷阱处置技术中试工程,在水华暴发期间蓝藻围隔可以拦截 50% 以上的蓝藻水华和 50% Chla 浓度,使其不进入围隔。水华拦截区围隔内的生物多样性显著高于拦截围隔之外的水域;在风向朝向陷阱时,该陷阱内可捕获水华蓝藻 2 kg/(m²·d)。因此,该技术在水华蓝藻严重的湖区具有广阔的应用前景。

4 结论

(1)通过对西半湖的调查,结果说明陷阱适宜于设置在巢湖西北岸万年埠湖段;

(2)水华拦截围隔对围栏外的水华有很好的拦截效果,可以显著地降低围隔内的 Chla 浓度和提高围隔内浮游植物的多样性指数,在水华暴发期间蓝藻围栏可以拦截 50% 以上的蓝藻水华和 50% 以上的 Chla 浓度,水华拦截区围隔内的生物多样性显著高于拦截围栏之外的水域;

(3)陷阱对微囊藻水华的聚集效果显著,并且在微弱南风或东南风的条件有利于水华蓝藻的聚集捕获,适宜条件下,陷阱中收藻效率为 $2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

参考文献:

- [1] YANG D T, PAN D L, ZHANG X Y, et al. Retrieval of chlorophyll a and suspended solid concentration by hyperspectral remote sensing Taihu Lake, China[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2006, 24: 428~434.
- [2] 刘 伟. 巢湖蓝藻重度发生时的水质特征分析[J]. 中国环境监测, 2007, 23(4): 101~102.
- [3] ZHANG N H, LI G, YU J Q, et al. Character of blue-green algal blooms outbreak in Taihu Lake[J]. Environ Monit China, 2009, 25: 71~74.
- [4] YAMAMOTO Y, NAKAHARA H. The formation and degradation of cyanobacterium *Aphanizomenon flos-aquae* blooms; The importance of pH, water temperature and day length[J]. Limnology, 2005, 6: 1~6.
- [5] BEYRUTH Z. Periodic disturbances, trophic gradient and phytoplankton characteristics related to cyanobacterial growth in Guarapiranga Reservoir, São Paulo State, Brazil[J]. Hydrobiologia, 2000, 424: 51~56.
- [6] 杨清心. 太湖水华成因及控制途径初探[J]. 湖泊科学, 1996, 8(1): 67~74.
- [7] FLEMMING H C. Biofouling in water systems-cases, causes and countermeasures[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2002, 59: 629~640.
- [8] TYAGI M M, THAKUR J K, SINGH D P, et al. Cyanobacterial toxins; The current status[J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 1999, 9: 9~21.
- [9] ROHRLACK T, DITTMANN E, HENNING M, et al. Role of microcystins in poisoning and food ingestion inhibition of *Daphnia galeata* caused by the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, 65: 737~739.
- [10] SHEN Y W, LIU Y D, WU G Q, et al. Mechanical removal of heavy cyanobacterial bloom in the hyper-eutrophic Lake Dianchi[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2004, 28(2): 131~135.
- [11] CONKLIN E, CO D E, HAUK B, et al. Use of a mechanical device to control alien algal blooms on a coral reef in Kaneohe Bay, Hawai'i [C]. Abstracts 11th International Coral Reef Symposium 216, 2008.
- [12] HAO H W, WU M S, CHEN Y F, 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 and Environmental Engineering, 2004, 36(6): 1 435~1 446.
- [13] HASLER A D, JONES E. Demonstration of the antagonistic action of large aquatic plants on algae and rotifers[J]. Ecology, 1949, 30(3): 359~364.
- [14] GROSS E M. Allelopathy of aquatic autotrophs[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2003, 22: 313~339.
- [15] MCKNIGHT D M, CHISHOLM S W, HARLEMAN D R F. CuSO_4 treatment of nuisance algal blooms in drinking water reservoirs[J]. Environmental Management, 1983, 7: 311~320.
- [16] HE R X, ZHENG Y J, GONG Z Q. Preparation and application of polyferric sulfate flocculants[J]. Environmental Science & Technology, 2004, 27: 146~149.
- [17] CHOI G, KIM P J, LEE W C, et al. Removal efficiency of *Cochlodinium polykrikoides* by yellow loess[J]. Journal of Korean Fishery Society, 1998, 31: 109~113.
- [18] PAN G, ZHANG M M, CHEN H, 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]. Environment Pollution, 2006, 141(2): 195~200.
- [19] DIMOVA G, MIHAILOV G, TZANKOV T Z. Combined filter for ammonia removal-Part I: Minimal zeolite contact time and requirements for desorption[J]. Water Science and Technology, 1999, 39: 123~129.
- [20] WANG Z C, LI G W, LI G B, et al. The decline process and major pathways of *Microcystis* bloom in Lake Taihu, China [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2012, 30(1): 37~46.
- [21] WANG Z C, LI DH, LI G W, et al. Mechanism of photosynthetic response in *Microcystis aeruginosa* PCC7806 to low inorganic phosphorus[J]. Harmful Algae, 2010, 9: 613~619.
- [22] WANG Z C, LI D H, QIN H J, et al. An integrated method for removal of harmful cyanobacterial blooms in eutrophic lakes[J]. Environmental Pollution, 2012, 160: 34~41.
- [23] WANG Z C, ZUO M, WANG Y C, et al. Dynamics of chlorophyll fluorescence and eco-morphological properties of *Microcystis* bloom in Meiliang Bay of Lake Taihu, China[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2011, 20(9): 2 295~2 305.

AN INTEGRATED TECHNOLOGY OF BLOOM-BARRIER AND BLOOM-TRAP FOR CYANOBACTERIAL BLOOM CONTROL

LI Dun-hai¹, WANG Zhi-cong^{1,2}, QIN Hong-jie^{1,2}, LI Yin-xia^{1,2}, ZHANG Lang^{1,2}

(1. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the influence of meteorological and hydrographical conditions on the distribution of *Microcystis* bloom, bloom-barrier and bloom-trap were constructed in Wannianbu coastal zone area in the Chao-hu Lake. The bloom-controlling effect of this integrated technology was evaluated by the comparison of water quality between inside and outside of the barrier or trap. Investigation results suggested that it is scientific and reasonable to build bloom-barrier and bloom-trap in Wannianbu coastal zone area, because the monitoring showed that the biomass of cyanobacterial bloom was aggregated by wind and water filed in the coastal zone area. Bloom-barrier had good effect for blocking the algae, and the blocking rates for bloom biomass and chl-a were higher than 50% and 50%, respectively. Also, the phytoplankton biodiversity inside the enclosure was significantly higher than that outside of the enclosure. Bloom-trap could efficiently collect and trap the cyanobacterial bloom, and the dry biomass could reach to 2 kg/(m² · day). All these results suggest that this integrated bloom-removal technology has high efficiency in bloom controlling, and it has a good prospect of application.

Key words: barrier; biodiversity; bloom control; cyanobacterial bloom; entrapment