

富营养湖泊滇池水华蓝藻的机械清除

沈银武 刘永定 吴国樵 敖鸿毅 丘昌强

(中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

摘要: 富营养湖泊暴发蓝藻水华时可集聚浓度达 $n \times 10^8 \sim 10^9$ cell/L, 利用重力振动、旋振和离心等方法收集富藻水, 逐次浓缩、脱水后得藻泥; 根据需要可对藻泥进行干燥, 得到干藻粉。2001 年 4 月至 2002 年 11 月在云南滇池以上述方式清除蓝藻水华 351d, 共处理富藻水 42648m³, 折合清除水华蓝藻干重为 460.83t。按所清除的蓝藻干粉的总氮、总磷、总钾、粗有机质及重金属的平均含量计算, 相当于从试验区水体中去除了氮(N) 37.33t、磷(P) 2.71t、钾(K) 2.49t 及粗有机质 200.32t; 重金属铅(Pb) 2.289kg、砷(As) 2.23kg、汞(Hg) 2.3kg、镉(Cd) 0.51kg。表明在富营养湖泊中水华蓝藻大量暴发时, 采用机械除藻, 对控制蓝藻水华污染, 有效降低内源氮、磷等污染物负荷具有十分重要的作用。

关键词: 富营养化; 湖泊; 水华蓝藻; 机械清除

中图分类号: X13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2004)02-0131-06

水库、湖泊是我国城乡居民重要的生活用水的水源地。近二十多年来, 随着工农业迅速发展, 人口剧增, 城镇化加速, 大量未经处理或未经有效处理的生活污水和工农业生产废水排入江河湖海, 使水环境受到严重污染, 许多水体的富营养化程度加剧, 引起浮游藻类特别是产毒微囊藻的大量增殖, 形成大量水华, 严重危害人体健康和破坏水体景观^[1-4]。随着经济的发展, 云南省昆明市滇池富营养化不断加剧, 在滇池外海蓝藻水华大量发生, 近期的研究结果表明, 滇池蓝藻的现存生物量约为 8000—10000t 干重, 尤其在 7—10 月的高温季节, 蓝藻水华的产生量最大, 造成严重的蓝藻水华污染。本文介绍 2001—2002 年滇池实施水华蓝藻机械清除工程与研究方面所取得的部分结果。

1 材料和方法

1.1 机械清除方法 采用岸边固定收藻设施和水上移动收藻设施对湖面蓝藻水华进行机械清除, 其工艺流程见图 1。由于滇池常年西南风、偏南风较多, 因此, 岸边固定收藻设施建于西南风、偏南风下风向的藻类水华富集区。为获得较高浓度的富藻水, 于藻类富集区(面向南风, 向湖心斜)拉一条用橡

胶浮体和不透水的尼龙布制成的浮式围栏, 使蓝藻水华按风向自然涌入集藻围栏内。在集藻围栏圈成的喇叭口形集藻区底端设置一个吸藻槽(或盘), 通过水泵将富藻水提升到振动重力斜筛过滤, 得藻浆。由于风向原因, 蓝藻水华有时吹到固定收藻区以外, 这时采用水上移动收藻设施收藻。在自制的简易平台船前部设置两只圆柱形浮臂, 使它们组成喇叭形浮在水面。在喇叭口底端设置一个吸藻槽, 通过水泵将表层富藻水提升到重力斜筛过滤, 得藻浆。

1.2 蓝藻脱水浓缩 藻浆分别采用卧螺离心机或旋振筛脱水浓缩成藻泥。重力斜筛由作者们设计和制作; 卧螺离心机由浙江 4819 工厂生产, 型号为 LWD430 型, 处理能力为 10m³/h 藻浆; 旋振筛由河南省新乡市东振机械有限公司生产, 为 S49-B 型。

1.3 干燥 利用烘干机或太阳能(塑料大棚内挂晒)将藻泥干燥成藻块, 然后通过粉碎机粉碎成蓝藻粉。

1.4 分析测定 烘干法测定水分; 依据 GB7888-87, GB/T5009.11-1996, GB/T6432-94, Z/NSJ00F1997 标准, 测定 N、P、K 和重金属, 分别由农业部食品质量监测中心(武汉)和云南省环境监测中心站测定。采用重铬酸钾容量法测有机物, 由云南省土壤肥料测试中心测定。

收稿日期: 2003-11-17; 修订日期: 2003-12-10

基金项目: 国家科技部、云南省重大课题“滇池蓝藻水华污染控制技术研究”(K99-05-35-01); 中科院重大项目(KZCX1-SW-12); 973 项目(2002CB412300); 863 项目(2002AA601011); 中国科学院前沿性创新课题(220316)资助

作者简介: 沈银武(1951—), 男, 湖北仙桃人, 从事藻类生物学研究

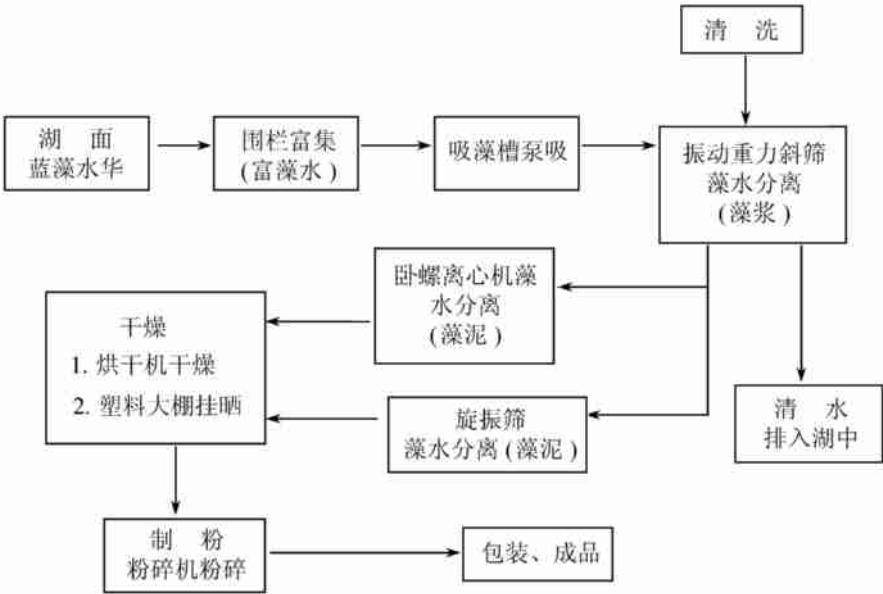


图 1 湖泊蓝藻水华收获制备方法工艺流程图

Fig. 1 The flow chart of method for harvesting cyanobacterial bloom in lakes

2 结果

2.1 吸藻设备的研制

为了有效收获水华蓝藻,提升泵设置在吸藻槽(盘)内,将大量水华通过提升泵泵入到过滤系统中

去。以提高收获效率,并对吸藻设备进行多次改进,先后研制出圆盘式吸藻盘、梯形吸藻槽和喇叭口式集藻槽等三种装置。在表层水华富集厚度为5cm时,三种吸藻装置在同一条件下的收获效果见表1。由表1可知喇叭口式吸藻盘收获效果最好。

表 1 三种吸藻装置在同一条件下收获效果比较(干重 kg/m³)

Tab. 1 Effect on gathering blooming cyanobacteria in three sucking devices under the same conditions

	表层 5cm 富藻水 Surface layer(5cm)	圆盘式吸藻盘 Sucking disc	梯形吸藻槽 Trapezoidal groove	喇叭口吸藻槽 Bugle groove
1	7. 70	9. 60	10. 40	13. 20
2	7. 80	9. 70	10. 80	13. 50
Average	7. 75	9. 65	10. 60	13. 35

2.2 振动重力斜筛与不振动重力斜筛对富藻水脱水浓缩的比较

为了提高滤除水华蓝藻的效率,对振动重力斜筛与不振动重力斜筛滤除水华蓝藻效果进行了比较试验,结果表明,振动斜筛与不振动斜筛获得的藻浆含水量分别为 96. 84% 和 98. 19%,振动斜筛脱水效果明显优于不振动斜筛(表 2)。另外,依据表 2 进入斜筛富藻水和斜筛过滤后得到的藻浆含水量分析,振动重力斜筛和不振动重力斜筛的收获率分别为79. 43% 和 64. 09%。

2.3 重力斜筛-旋振筛联用藻水分离系统

对振动斜筛-旋振筛联用藻水分离系统的研究结果表明,含水量为 96. 76% 藻浆,通过 400 目网旋振筛浓缩后,获得含水量为 91. 71% 的藻泥。而旋振筛网目为 325 目时,浓缩后,含水量为 96. 82% 的藻浆变成了含水量为 90. 84% 的藻泥(表 3)。

2.4 重力斜筛-卧螺离心机联用藻水分离系统

富藻水通过重力斜筛过滤得到的藻浆含水量为 97% —98% 时,藻浆通过卧螺离心机浓缩脱水后得到的藻泥含水量为 92% 左右。

表 2 振动与不振动斜筛所获藻浆含水量比较(%)

Tab. 2 Comparison on water contents of algal mud between shaking and no shaking tilted sieve

样品号 Sample	斜筛进藻水 Tilted sieve	振动斜筛 Shaking	不振动斜筛 No shaking	样品号 Sample	斜筛进藻水 Tilted sieve	振动斜筛 Shaking	不振动斜筛 No shaking
135	99.38	96.77	98.48	142	99.12	97.59	98.83
136	99.68	95.40	97.34	143	99.53	96.42	97.57
137	99.17	97.21	98.10	144	99.20	97.28	98.64
138	99.28	96.08	97.98	145	99.33	95.77	98.50
139	99.23	96.47	98.44	146	99.75	96.90	97.93
140	99.11	97.71	98.60	平均 Average	99.35	96.84	98.19
141	99.47	98.52	97.85				

表 3 重力斜筛 旋振筛联用藻水分离系统含水量测定结果(%)

Tab. 3 Water content of algal mud by from separating system with gravitational rotating tilted sieve

筛目 Mesh	测定日期 Date	斜筛进料口富藻水 Water input in tilted sieve	斜筛出料口藻浆 Algal mud output in tilted sieve	斜筛滤出水 Filtration water output	旋振筛出料口藻泥 Algal mud output in rotating sieve	旋振筛滤出水 Filtration water output in rotating sieve
	5.11	99.75	97.56	99.88	91.83	99.84
400	5.16	99.36	96.90	99.82	91.07	99.08
目	5.18	99.33	95.77	99.67	90.89	99.05
	5.19	99.61	96.72	99.87	92.50	99.55
400	5.20	99.34	96.86	99.38	92.26	99.49
Mesh	Average	99.48	96.76	99.72	91.71	99.40
	5.24	98.87	97.07	99.47	90.60	99.23
325	5.26	99.44	96.22	99.75	90.74	99.68
目	5.28	99.80	97.23	99.88	90.74	99.72
	5.29	99.49	96.60	99.80	91.43	99.68
325	5.30	99.74	96.98	99.82	90.69	99.69
Mesh	Average	99.67	96.82	99.74	90.84	99.60

2.5 蓝藻水华生物量的收获

351d, 得富藻水 42648m³, 按每月测定收获富藻水和排出水中所含干藻重量差计算, 合干重 460.831t(表 4)。

2001 年 4 月 1 日滇池开始出现水华时, 机械收藻工程就开始正式运转, 至 2002 年 11 月份共收获蓝藻

表 4 蓝藻水华收获量

Tab. 4 Gathering amount of cyanobacterial bloom

年份/月 Year/month	收获日数(d) Gathering day	收富藻水量(m ³) Algal water	富藻水含干藻量(kg/m ³) Dry algae content	排出水含干藻量(kg/m ³) Dry algae content in filtration	折合干重(t) Amount dry weight
2001.4	12	370	15.4	4.7	3.96
2001.5	24	1698	22.7	4.1	31.58
2001.6	24	3284	19.8	4.6	49.92
2001.7	31	4017	21.7	4.5	69.09
2001.8	28	3810	29.8	9.9	75.82
2001.9	28	3782	23.7	6.4	65.43
2001.10	16	1245	8.8	4.1	5.85

续表					
年份/月	收获日数(d)	收富藻水量(m ³)	富藻水含干藻量(kg/m ³)	排出水含干藻量(kg/m ³)	折合干重(t)
Year/month	Gathering day	Algal water	Dry algae content	Dry algae content in filtration	Amount dry weight
2001. 11	30	2220	8. 9	2. 0	15. 32
2001. 12	17	945	19. 2	6. 3	12. 19
2002. 1	9	656	18. 1	3. 3	9. 71
2002. 5	21	2535	0. 85	0. 35	12. 68
2002. 6	24	3686	0. 73	0. 25	17. 70
2002. 7	23	3610	1. 28	0. 53	27. 08
2002. 8	13	750	0. 96	0. 24	5. 40
2002. 9	7	600	0. 53	0. 16	2. 22
2002. 10	18	1370	0. 54	0. 22	4. 38
2002. 11	24	3660/3060	0. 80/ 1. 69	0. 45/0. 53	48. 31
2002. 12	2	1350	0. 56	0. 25	4. 19
合计 total	351	42648			460. 83

2.6 蓝藻细胞成分分析

2001 年采集的蓝藻检测结果表明蓝藻干粉的氮、磷、钾和粗有机物的含量 8. 1%、0. 47%、0. 54% 和 43. 47%; 重金属砷、铅、汞和镉的含量分别为 4. 84, 4. 94, 5. 55mg/ kg 和 1. 11(表 5)。从表 3 和 4 可以看

出, 2001 年 4 月至 2002 年 11 月之间, 通过机械清除水华蓝藻, 从实验湖区去除了 460. 83t 蓝藻干物质、37. 33t 氮(N)、2. 71t 磷(P)、2. 49t 钾(K)、200. 32t 粗有机物、2. 289kg 铅(Pb)、2. 23kg 砷(As)、2. 3kg 汞(Hg) 和镉 0. 51kg(Cd)。

表 5 蓝藻干粉氮磷钾与重金属含量的测定结果
Tab. 5 Content of N, P, K and heavy metals in the dry blue green algal powder

样品 Sample	全氮 Total N (N%)	全磷 Total P (P%)	全钾 Total K (K%)	粗有机物 Organic matter (%)	砷 As (mg/kg)	铅 pb (mg/ kg)	汞 Hg (mg/ kg)	镉 Cd (mg/ kg)
5 月(May)	7. 89	0. 43	0. 50					
6 月(June)	7. 95	0. 44	0. 50		5. 97	7. 23	9. 27	1. 07
7 月(July)	8. 18	0. 36	0. 53					
8 月(Aug.)	8. 09	0. 40	0. 54		4. 51	5. 33	5. 14	1. 00
9 月(Sept.)	7. 73	0. 50	0. 56		5. 93	5. 46	3. 55	0. 87
10 月(Oct.)	7. 53	0. 51	0. 51		2. 43	5. 62	3. 97	0. 94
11 月(Nov.)	7. 27	0. 58	0. 52		5. 55	5. 32	3. 06	0. 81
1600	9. 25	0. 42		42. 94				
1601	8. 56	0. 54	0. 71	42. 72				
1602	9. 11	0. 65	0. 74	44. 75				
0838	8. 29	0. 47	0. 48		5. 50			1. 66
0839	7. 36	0. 36	0. 30		4. 00	0. 69		1. 45
平均 Average	8. 10	0. 47	0. 54	43. 47	4. 84	4. 94	5. 00	1. 11
460. 83t 蓝藻含量	37. 33t	2. 17t	2. 49t	200. 32t	2. 23kg	2. 28kg	2. 3kg	0. 51kg
Total content in algal powder								

3 讨论

湖泊大量发生的水华蓝藻一方面严重污染环境、危害饮水水源, 另一方面给旅游业带来了极大的影响。为减轻湖泊的污染, 消除蓝藻异味, 有必要对大量堆积的蓝藻水华进行有效的清除。清除蓝藻水华有化学、生物学和物理学等方法^[5-7], 采用化学方法在湖泊中投放化学药品或试剂, 必然对水质带来不同程度的危害; 生物学方法清除蓝藻水华虽然不存在化学污染问题, 但在湖泊大量投放食藻动物, 将有可能对湖泊生物种群结构、生物多样性造成一定的影响; 微生物学等受湖泊环境条件影响难以起到较理想的效果^[8]; 物理学方法有机械清除、生物曝气等多种方法, 采用机械方法清除蓝藻水华, 能直接大量清除湖面蓝藻水华, 且无明显负面影响。因此, 在蓝藻水华大量发生季节, 采用机械方法清除湖面水华并加以综合利用, 防止恶性增殖和二次污染, 并由此降低水体营养水平污染负荷, 从而可达到改善水环境之目的, 是十分值得推广应用的一项高效实用技术。

从本研究采用的设备及工艺看, 喇叭口式吸藻槽抽吸富藻水-振动重力斜筛过滤脱水成藻浆-卧螺离心机脱水、浓缩成藻泥工艺较为理想, 处理量大, 操作简便, 适于规模化生产运作。旋振筛浓缩效果较卧螺离心机稍好, 但处理量小, 适于生产规模较小的条件下采用。实践证明, 本研究的工艺路线简单, 设备价格较低, 水华蓝藻收获量大, 处理效率高。2001—2002 年在 2.5 km² 试验区范围内, 通过机械清除的水华蓝藻相当于从滇池去除 37.33t 氮、2.17t 磷, 根据云南省环境科学研究所 1988 的研究资料, 通过此方法从滇池去除的 N、P 营养物大大高于通过降雨、降尘和旅游带入昆明草海湖面的污染物(N10.34t, P1.4t/a); 亦高于东大河(水量 2084 × 10⁴ m³/a) 一年流入滇池的地表径流和污染物中的养分(N24.00t, P2.44t/a)^[9]。

2002 年清除蓝藻水华的量明显低于 2001 年(表 3), 这除了与试验区采取了其他控藻措施产生的积极效果相关外, 作者认为前期加大机械清除蓝藻量对控制后期水华暴发可以起一定作用。例如 2002 年 5、6 月份开始出现蓝藻水华时, 加大了清除力度, 富藻水收获量大于 2001 年, 导致 2002 年 7—10 月的蓝藻水华量明显低于 2001 年同期, 2002 年 11 月份几乎整月刮偏南风 and 西南风, 导致滇池试验区外的水华蓝藻大量涌入了试验区, 立即加大水华收获量后, 12 月水华暴发量明显低于 2001 年同期, 2003 年元月试验区基

本没有发生可收获的水华(表 3)。这些结果说明, 利用机械的方法清除水华蓝藻, 对控制蓝藻污染可以起到较为重要的作用。

参考文献:

- [1] Yu J L, Chen M H, Lin K E, *et al.*, Study on the toxicity of water bloom in the Donghu Lake Wuhan I. Detection of the toxic effect of bluegreen algae[J]. *Acta hydrobiologica Sinica*, 1987, **11**(3): 212—218. [俞家禄, 陈明惠, 林坤二, 等. 武汉东湖蓝藻水华毒性的研究 I, 淡水蓝藻毒性的检测. 水生生物学报, 1987, **11**(3): 212—218]
- [2] He J W, Li L P, Yu J L, *et al.*, Preliminary studies on a Chinese New record of blue green algae *Microcystis wesenbergii* and its toxicity[J]. *Acta hydrobiologica Sinica*, 1996, **20**(2): 192—194. [何家宛, 李络平, 俞家禄, 等. 我国产毒微藻新发现——惠氏微囊藻及其毒性初步研究. 水生生物学报, 1996, **20**(2): 192—194]
- [3] Zhang Q X, Yu M J. Toxicities and toxin of *Microcystis aeruginosa* waterblooms from CHAO lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1989, **9**(1): 86—94. [张青学, 俞敏娟. 铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)水华毒性及毒素研究. 环境科学学报, 1989, **9**(1): 86—94]
- [4] Song L R, Lei L M, He Z R, *et al.*, Growth and toxin analysis in two toxic Cyanobacteria *Microcystis aeruginosa* and *Microcystis viridis* isolated from Dianchi Lake[J]. *Acta hydrobiologica Sinica*, 1999, **23**(5): 403—408. [宋立荣, 雷腊梅, 何振荣, 等. 滇池水华蓝藻铜绿微囊藻和绿色微囊藻的生长生理特性及毒素分析. 水生生物学报, 1999, **23**(5): 403—408]
- [5] Pu Peimin, Wang G X, Li Z K, *et al.*, Degradation of healthy aquatic ecosystem and its remediation: Theory, technology and application[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2001, **13**(3): 193—203. [濮培民, 王国祥, 李正魁, 等. 健康水生态系统的退化及其修复——理论、技术及应用. 湖泊科学, 2001, **13**(3): 193—203]
- [6] Chen W, Li J B, Zhou H C. Removal of blue algae from Tai Lake with potassium permanganate composite (PPC)[J]. *Journal of Harbin University of C. E. & Architecture*, 2001, **34**(3): 72—74. [陈卫, 李圭白, 邹浩春. 高锰酸钾复合药剂清除太湖水华蓝藻的室内试验研究. 哈尔滨建筑大学学报, 2001, **34**(3): 72—74]
- [7] Zhou L, Chen J. The experimentation on inhibition blue green algal bloom by using algacide in the lake[J]. *Environ. Engin.* 1999, **17**(4): 75—77. [周霖, 陈劲. 用杀藻剂抑制湖泊蓝藻水华的尝试. 环境工程, 1999, **17**(4): 75—77]
- [8] Wan D B, Qiu C Q, Liu J T, *et al.*, Feasible Techniques for microalgae removal from wastewater stabilization ponds[J]. *Chin. Appl. Environ. Biol.* 1999, **5**(Suppl): 84—87. [王登榜, 丘昌强, 刘剑彤, 等. 污水稳定塘除藻的可行性技术研究. 应用与环境生物学报, 1999, **5**(Suppl): 84—87]
- [9] Yang S H, He B. Landscape pattern and area pollution control in valley of Dianchi Lake [M]. Kunming: Yunnan Sciences Press 1998, 4—10. [杨树华, 贺彬. 滇池流域的景观格局与面源污染控制, 昆明: 云南科技出版社 1998, 4—10]

MECHANICAL REMOVAL OF HEAVY CYANOBACTERIAL BLOOM IN
THE HYPER EUTROPHIC LAKE DIANCHI

SHEN YinWu, LIU YongDing, WU GuoQiao, AO HongYi and QIU ChangQiang
(*Institute of Hydrobiology, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072*)

Abstract: In eutrophic lakes dense concentration of the outbreak of cyanobacterial bloom could reach up to 10^{8-9} cells/l in the water. By using several techniques as gravitational shaking, rotating shaking and centrifuging, the surface water was cleaned out in turn of condensing, dehydrating to harvest the algal mud; and then drying to powder or not according to the further requirement for processing. During April 2001 to November 2002 the technology was applied in lake Dianchi for 351 days. The total amount of treating surface water in lake Dianchi was 42648m^3 , amounted to 460.83tons in dry weight of algal powder. In accordance with the composition determination of total nitrogen, total phosphors, total potassium, crude organic matters and heavy metals in algal powder, the removed algal biomass corresponded to taking out of 37.33t(N), 2.71t(P), 2.49t(K), and 200.32t(crude organic matters), as well as the heavy metals of 2.289kg(Pb), 2.23kg(As), 2.3kg(Hg), 0.51kg(Cd) respectively from the lake. The results indicated that the mechanical removing is a feasible and helpful way in the hyper-eutrophic water bodies to control the out-breaking of cyanobacterial bloom and to reduce the inner nutrient load.

Key words: Eutrophication; Lake; Bloom forming cyanobacteria; Mechanical removal.