

红枫湖蓝藻水华的成因及其控制对策^{*1}

李峰¹ 秦红超² 龙汉武¹ 向立容¹ 朱立³

(1 贵州省生物研究所, 贵州贵阳 550009;

2 国家城市供水水质监测网贵阳监测站, 贵州贵阳 550000;

3 贵州省植物园, 贵州贵阳 550004)

【摘要】:2009—2011 年, 项目组通过收集历史资料、采集水样、室内检测和鉴定, 明确了红枫湖水华形成的藻类种类为蓝藻门、色球藻目、色球藻科、微囊藻属的铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*), 并结合野外水华形成过程的原位观测和数据分析, 探讨了红枫湖水华发生的原因, 并提出了相应的控制措施。

【关键词】:红枫湖, 蓝藻, 水华

【中图分类号】:Q179.1 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1003-6563(2017)03-0011-08

红枫湖位于贵州省中部清镇市、平坝县和安顺市西秀区境内, 建于 1958 年, 蓄水面积 57.20km², 流域面积 1596.00km², 库容 6.01 亿 m³, 最大水深 45.00m, 为贵州省最大的人工湖, 有“高原明珠”之誉。红枫湖不仅是著名的风景名胜区, 也是贵阳市最重要的三个饮用水源地之一, 承担着贵阳市中心城区 70%以上居民饮用水和清镇市所有居民用水的供给任务。据调查资料^[1]显示, 1994—2008 年, 红枫湖基本上每年都出现过大面积的“水华”现象。贵州的多家媒体也相继报道了 2005—2007 年红枫湖出现大面积蓝藻水华导致居民饮用水困难。本文通过 2010 年和 2011 年对红枫湖的浮游生物及主要水质指标的监测, 结合历史资料、野外水文、气象和水华的观测结果, 探讨了红枫湖水华发生的原因, 并提出了相应的控制措施。

1 材料与方法

1.1 工作区域

研究地点:红枫湖水体。

1.2 工作方法

¹ 收稿日期:2016—12—26; 修回日期:2017—01—06

***基金项目**:红枫湖水华的形成机制及其控制对策研究, 项目合同编号:黔科合 J 字 [2009] 2035 号。

作者简介:李峰(1969—), 男, 汉族, 籍贯四川, 大学本科, 助研, 研究方向:淡水生物。

通讯作者:朱立(1975—), 女, 汉族, 籍贯贵州, 大学本科, 高级工程师, 从事植物学及植物资源搜集、利用等方面研究工作。

1.2.1 样点设置

通过调查走访和收集红枫湖形成水华的历史资料,按照水华的分布特征,选择滴澄关码头(N26° 32' 28" E106° 25' 38")、兴隆半岛(N26° 32' 27" E106° 24' 59")、苗寨(N26° 32' 2" E106° 25' 8")、将军湾(N26° 28' 31" E106° 25' 7")和红枫水产公司(N26° 28' E106° 23' 53")作为采样点。

1.2.2 样品的采集与处理

样品的采集、处理和计数按《内陆水域渔业自然资源调查手册》^[2]进行。自2010年4月开始,每年采集水样三次,至2011年11月结束,定性样品采集(浮游植物、原生动物和轮虫等)采用25号浮游生物网(网孔0.064mm)于水面下0.5m处拖捞获取;枝角类和桡足类等浮游动物采用13号浮游生物网(网孔0.112mm),在表层中拖滤1min—3min。定量样品采集用玻璃采样器采集;浮游生物样品采集后,按水样体积加5%的福尔马林溶液固定,带回实验室镜检。

1.2.3 浮游生物鉴定

主要观察活体与固定样,室内用带数码摄像功能的显微镜观察,物种鉴定主要依据文献^[3-7]。

1.2.4 取样点分布图(图1)

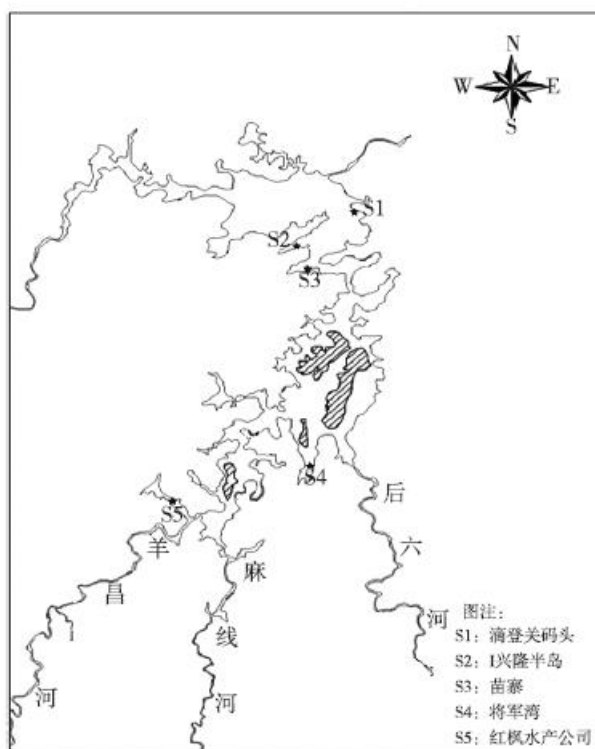


图1 各采样点分布示意图

Fig. 1 Distribution of sampling sites

2 结果与分析

2.1 浮游植物的种类组成(表 1)

表 1 红枫湖浮游植物种类组成

Tab. 1 Phytoplankton composition in Hongfeng Lake

序号	种类(中文名)	拉丁学名
	一、蓝藻门	Bacillariophyta
1	铜绿微囊藻	<i>Microcystis aeruginosa</i>
2	水华微囊藻	<i>Microcystis flos-aquae</i>
3	不定微囊藻	<i>Microcystis incerta</i>
4	光辉色球藻	<i>Chroococcus splendilus Jao.</i>
5	微小色球藻	<i>Chroococcus minutus</i>
序号	种类(中文名)	拉丁学名
6	色球藻	<i>Chroococcus sp.</i>
7	蓝纤维藻属	<i>Dactylococcopsis</i>
8	针状蓝纤维藻	<i>Dactylococcopsis acicularis</i>
9	细小平裂藻	<i>Merismopedia tenuissima</i>
10	银灰平裂藻	<i>Merismopedia glauc</i>
11	平裂藻	<i>Merismopedia sp.</i>
12	小席藻	<i>Phormidium tenue</i>
13	小颤藻	<i>Oscillatoria tenuis</i>
14	巨颤藻	<i>Oscillatoria princeps</i>
15	极大螺旋藻	<i>Spirulina maxima</i>
16	大螺旋藻	<i>Spirulina major Kutz</i>
17	伪鱼腥藻	<i>Pseudoanabaena sp</i>
18	多变鱼腥藻	<i>Anabaena variabilis</i>
19	湖丝藻	<i>Limnithrix sp.</i>
	二、金藻门	Chrysophyta
20	变形棕鞭藻	<i>Ochromonas mutabilis Klebs</i>
21	锥囊藻	<i>Dinobryon sp.</i>
	三、甲藻门	Pyrrophyceae
22	盾形多甲藻	<i>Peridinium umbonatum</i>
23	沃尔多甲藻	<i>Peridinium volzii</i>

24	角甲藻	<i>Ceratium hirundinella</i>
25	飞燕角藻	<i>Ceratium hirundinella</i>
26	叉角藻	<i>Ceratium furca</i>
27	裸甲藻	<i>Gymnodinium aeruginosum</i>
	四、黄藻门	Xanthophyta
28	绿黄丝藻	<i>Tribonema viride</i>
29	囊状黄丝藻	<i>Tribonema utriculosum</i>
	五、硅藻门	Bacillariophyta
30	梅尼小环藻	<i>Cyclotella meneghiniana</i>
31	广缘小环藻	<i>Cyclotella bodanica</i>
32	星芒小环藻	<i>Cyclotella stelligera</i>
33	小环藻	<i>Cyclotella sp.</i>
34	针杆藻	<i>Synedra sp.</i>
35	尖针杆藻	<i>Synedra acus</i>
36	颗粒直链藻	<i>Melosira granulata</i>
37	巴豆叶脆杆藻	<i>Fragilaria crotonensis</i>
38	长刺根管藻	<i>Rhizosolenia longiseta</i>
39	扁圆舟形藻	<i>Navicula palcentula</i> (Ehr.) Grun
40	微绿舟形藻	<i>Navicula viridula</i>
41	舟形藻	<i>Navicula sp.</i>
42	针形菱形藻	<i>Nitzschia acicularis</i>
	六、绿藻门	Chlorophyta
43	球团藻	<i>Volvox globator</i>
44	美丽团藻	<i>Volvox aureus</i>
45	针形纤维藻	<i>Ankistrodesmus acicularis</i>
46	镰形纤维藻	<i>Ankistrodesmus falcatus</i>
47	小空星藻	<i>Coelastrum microporum</i>
48	小球藻	<i>Chlorella vulgaris</i>
49	斜生栅藻	<i>Scenedesmus obliquus</i>
50	尖细栅藻	<i>Scenedesmus acuminatus</i>

序号	种类(中文名)	拉丁学名
51	蹄形藻	<i>Kirchneriella</i> sp.
52	月牙藻	<i>Selenastrum</i> sp.
53	单角盘星藻	<i>Pediastrum simplex</i>
54	盘星藻	<i>Pediastrum</i> sp.
55	弓形藻	<i>Schroederia</i> sp.
56	空球藻	<i>Eudorina elegans</i> Ehrenberg
57	杂球藻	<i>Pleodorina</i> sp.
58	微芒藻	<i>Microactinium</i> sp.
59	绿球藻	<i>Chlorococcum</i> sp.
60	多形角星鼓藻	<i>Staurostrum polynterphum</i>
61	纤细角星鼓藻	<i>Staurostrum gracile</i>
62	膨胀角星鼓藻	<i>Staurostrum dilatatum</i>
63	胶网藻	<i>Dictyosphaerium ehrenbergianum</i>
	七、隐藻门	Cryptophyceae
64	卵形隐藻	<i>Cryptomonas ovata</i>

本次调查,共鉴定出红枫湖的浮游植物7门64种,蓝藻19种,占总数的29.7%;金藻2种,占3%;甲藻6种,占9.4%;黄藻2种,占3%;硅藻13种,占20.3%;绿藻21种,占32.8%;隐藻1种,占1.5%。种类较多的是绿藻、蓝藻和硅藻,如图2所示。具体浮游植物种类见表1。

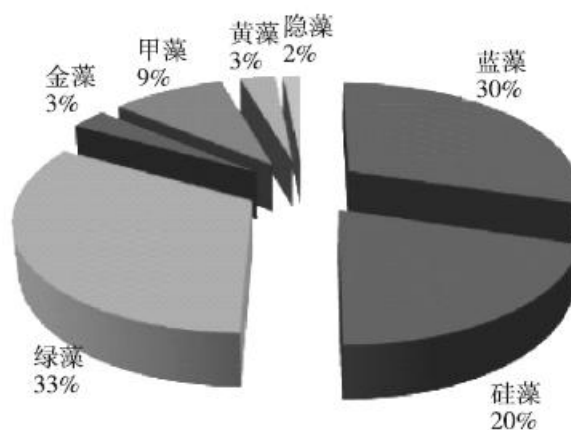


图2 红枫湖藻类组成

Fig. 2 Algal composition in Hongfeng Lake

2.2 浮游动物的种类组成(表2)

本次调查,共鉴定出轮虫19种、枝角类6种、桡足类10种,分别占总数的54.4%、17%和28.6%,如图3所示。具体浮游动物种类见表2。

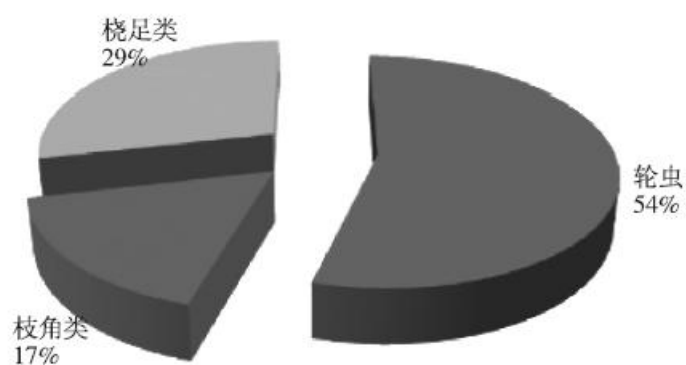


图 3 红枫湖浮游动物组成

Fig. 3 Zooplankter composition in Hongfeng Lake

表 2 红枫湖浮游动物种类组成

Tab. 2 Zooplankter composition in Hongfeng Lake

序号	种 类	拉丁学名
一、轮虫		
1	钩状狭甲轮虫	<i>Colurella uncinata</i>
2	镰状臂尾轮虫	<i>Brachionus falcatus</i>
3	角突臂尾轮虫	<i>Brachionus angularis</i>
4	萼花臂尾轮虫	<i>Brachionus calyciflorus</i>
5	裂足臂尾轮虫	<i>Brachionus diversicornis</i>
6	方形臂尾轮虫	<i>Brachionus quadridentatus</i>
7	暗小异尾轮虫	<i>Trichocerca pusilla</i>
8	纵长异尾轮虫	<i>Trichocerca elongata</i>
9	圆筒异尾轮虫	<i>Trichocerca cylindrica</i>
10	尖角单趾轮虫	<i>Monostyla hamata</i>

序号	种 类	拉丁学名
11	螺形龟甲轮虫	<i>Keratella cochlearis</i>
12	缘板龟甲轮虫	<i>Keratella ticinensis</i>
13	曲腿龟甲轮虫	<i>Keratella valga</i>
14	没尾无柄轮虫	<i>Ascomorpha ecaudis</i>
15	疣毛轮虫	<i>Synchaeta sp</i>
16	多肢轮虫	<i>Polyarthra sp.</i>
17	晶囊轮虫	<i>Asplanchna sp.</i>
	二、枝角类	
18	短尾秀体蚤	<i>Diaphanosoma brachyurum</i>
19	长肢秀体蚤	<i>Diaphanosoma leu chtenbergianum</i>
20	颈沟基合蚤	<i>Bosminopsis deitersi</i>
21	蚤状蚤	<i>Daphnia (Daphnia.) pulex</i>
22	筒弧象鼻蚤	<i>Bosmina coregoni</i>
23	长额象鼻蚤	<i>Bosmina longirostris</i>
	三、桡足类	
24	汤匙华哲水蚤	<i>Sinocalanus dorrii</i>
25	球状许水蚤	<i>Schmackeria forbesi</i>
26	右突新镖水蚤	<i>Neodiaptomus schmackeri</i>
27	广布中剑水蚤	<i>Mesocyclops leuckarti</i>
28	近邻剑水蚤	<i>Cyclops vicinus</i>
29	绿色近剑水蚤	<i>Tropocyclops prasinus prasinus</i>
30	短尾近剑水蚤	<i>Tropocyclops prasinus</i>
31	透明温剑水蚤	<i>Thermocyclops hyalinus</i>
32	蒙古温剑水蚤	<i>Thermocyclops mongolicus</i>
33	无节幼体	<i>Nauplius</i>

2.3 确定红枫湖水华藻类的种类

2.3.1 红枫湖水华样品的形态

在样品管内，红枫湖水华外表呈淡绿色、絮状，聚集成大至肉眼可见的群落，放置一段时间后，上部清水无色，藻类沉淀至底部。

2.3.2 红枫湖水华样品在显微镜下的形态(图 4—9)

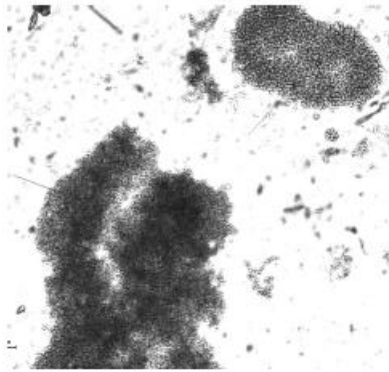


图 4 样品水华的显微形态图 (10×10)

Fig. 4 Microscopic morphology of bloom sample

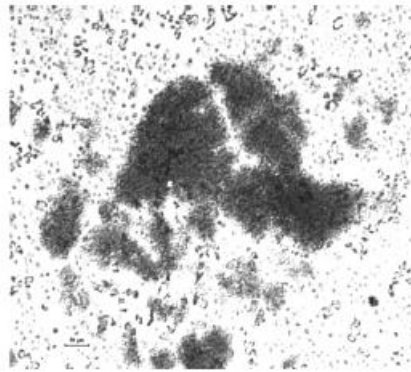


图 5 样品水华的显微形态图 (10×10)

Fig. 5 Microscopic morphology of bloom sample

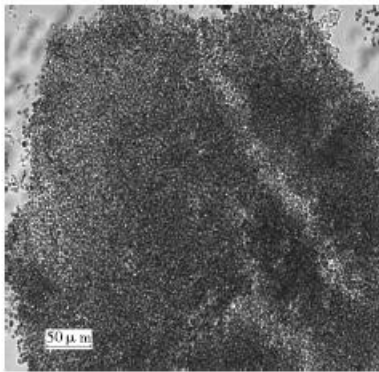


图 6 样品水华的显微形态图 (10×20)

Fig. 6 Microscopic morphology of bloom sample

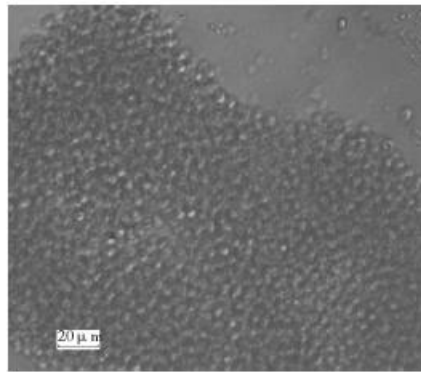


图 7 样品水华的显微形态图 (10×40)

Fig. 7 Microscopic morphology of bloom sample

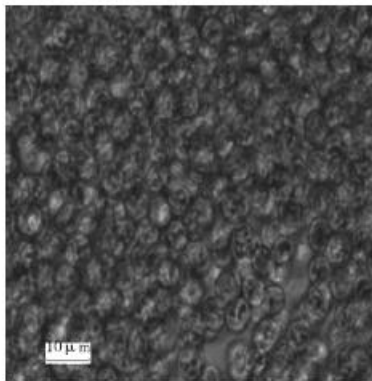


图 8 样品水华的显微形态图 (10 × 100)

Fig. 8 Microscopic morphology of bloom sample

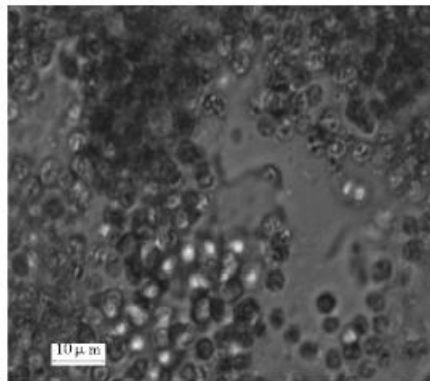


图 9 样品水华的显微形态图 (10 × 100)

Fig. 9 Microscopic morphology of bloom sample

在显微形态下, 红枫湖水华群体呈球形团块状或不规则形成穿孔的网状团块, 橄榄绿色或灰褐色。细胞球形或长圆形、直径 $3\mu\text{m}$ — $7\mu\text{m}$, 互相贴靠, 中实; 成熟后为中空地囊状体, 随着群体的不断增长, 胶被的某些区域破裂或穿孔, 使群体成窗格状的囊状体或不规则裂片状的网状体; 群体最后破裂成不规则的、大小不一的裂片; 此裂片又可成为一个窗格状群体。群体胶被质地均匀, 无层理, 无色透明, 明显, 但边缘部高度水化。

2.3.3 红枫湖水华的藻类鉴定

通过对红枫湖水华藻类的显微形态观察, 对照相关的鉴定资料, 进行形态特征鉴定, 最终确定红枫湖水华的藻类为蓝藻门的铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*)。

3 红枫湖蓝藻水华的研究

3.1 红枫湖蓝藻水华的形成机制

3.1.1 野外观察

出现频率: 1994—2010 年, 每年都会出现大面积的“水华”现象, 其中 2005—2007 年暴发的蓝藻水华影响程度严重, 覆盖范围较大, 2009 年和 2010 年仅有少量零星水华出现, 2011 年和 2012 年未出现水华。

发生时间: 每年的 3—5 月和 9—10 月, 晴天高温时发生, 下雨天很少。

分布: 库湾及全湖。零星少量的蓝藻水华首先出现在库湾, 大量爆发时可扩散至全湖。

主要地点: 将军湾、红枫水产公司、滴澄关码头、兴隆半岛和苗寨。

3.1.2 红枫湖各年度水质检测指标 (表 3—5)

对采集的水样按水质评价和监测标准进行理化指标(主要包括总磷、总氮、氨氮、化学需氧量、高锰酸盐指数、色度、浊度、叶绿素和 PH 等)检测, 结果见表 3—5。

表 3 红枫湖水样检测结果数据统计(2006 年—2010 年)

Tab. 3 Water testing data of Hongfeng Lake, 2006—2010

年份 \ 名称	总磷/ (mg/L)	总氮/ (mg/L)	氨氮/ (mg/L)	化学需氧量 COD/ (mg/L)	高锰酸 盐指数/ (mg/L)	PH
2006 年(大坝)	0.10	1.69	0.32	32	2.90	8.33
2007 年(大坝)	0.13	2.03	0.32	33	3.10	8.29
2008 年(大坝)	0.04	1.63	0.06	29	3.00	8.26
2009 年(大坝)	0.07	1.38	0.15	14	2.80	8.31
2010 年(大坝)	0.03	1.54	0.18	12	2.50	8.26
2010 年(库区中央)	0.05	2.00	0.15		2.60	8.20
富营养水体一般指标	0.01—0.02	0.2—0.3		10		7—9

表 4 红枫湖水样检测结果数据统计(2011 年)

Tab. 4 Water testing data of Hongfeng Lake, 2011

检测项目	富营养水体 一般指标	1# (滴澄关码头)	2# (苗寨水样)	3# (红枫湖将军湾)
pH 值	7—9	6.89	7.15	7.48
总磷/(mg/L)	0.01—0.02	< 0.001	0.001	0.005
色度/(度)		10	10	45
浊度/(度)		< 3	< 3	< 3
叶绿素/(mg/L)	0.01	$c_a=0.0105$ $c_b=$ 未检出 $c_c=$ 未检出	$c_a=0.15$ $c_b=0.11$ $c_c=0.31$	$c_a=0.0083$ $c_b=$ 未检出 $c_c=$ 未检出
总氮/(mg/L)	0.2—0.3	0.673	0.765	0.594
氨氮/(mg/L)		0.156	0.218	0.112
硝酸盐氮(mg/L)		0.372	0.456	0.334
亚硝酸盐氮/(mg/L)		0.028	0.073	0.058
化学需氧量 COD/(mg/L)	10	1.36	0.64	0.62

表 5 红枫湖水样检测结果数据统计(2012 年)

Tab. 5 Water testing data of Hongfeng Lake, 2012

检测项目	富营养水体 一般指标	滴澄关码头	苗寨水样	红枫湖将军湾
pH 值	7 - 9	7.64	7.76	7.68
总磷/($\mu\text{g/L}$)	0.01 - 0.02	<0.01	<0.01	<0.01
色度/(度)		10	25	30
浊度/(度)		<3	<3	<3
叶绿素/(mg/L)	0.01	$c_a=0.0719$	$c_a=0.0930$	$c_a=0.383$
		$c_b=0.100$	$c_b=0.0793$	$c_b=0.0702$
		$c_c=0.254$	$c_c=0.212$	$c_c=0.176$
总氮/(mg/L)	0.2 - 0.3	0.944	1.43	1.17
氨氮/(mg/L)		0.185	0.265	0.137
硝酸盐氮/(mg/L)		0.41	1.33	0.71
亚硝酸盐氮/(mg/L)		0.032	0.089	0.069
化学需氧量 COD/(mg/L)	10	2.87	3.18	3.88

3.1.3 红枫湖水体总磷、总氮和化学需氧量各年度的变化趋势(图 10—12)

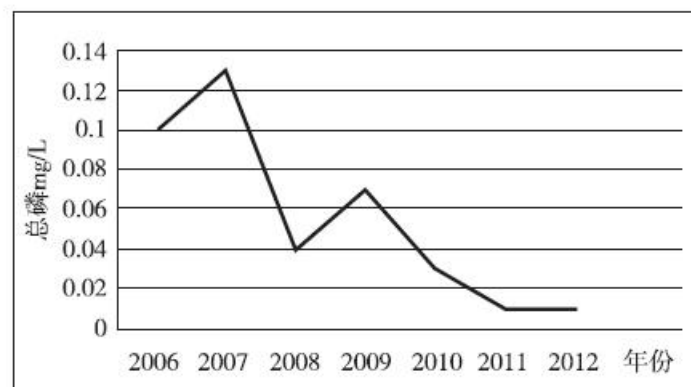


图 10 总磷浓度在不同年份的变化

Fig. 10 The change trend of total phosphorus, total nitrogen and chemical oxygen demand in Hongfeng Lake

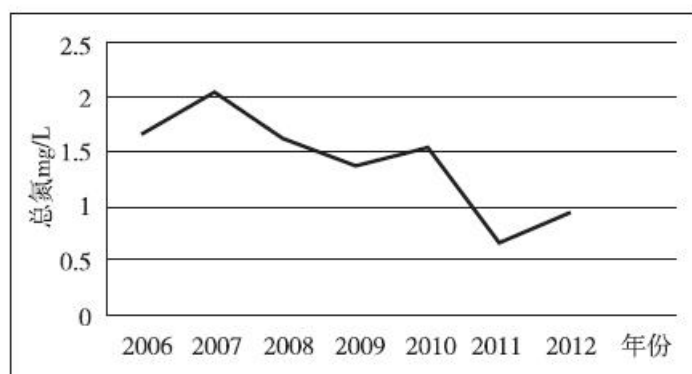


图 11 总氮浓度在不同年份的变化

Fig. 11 The change trend of total phosphorus, total nitrogen and chemical oxygen demand in Hongfeng Lake

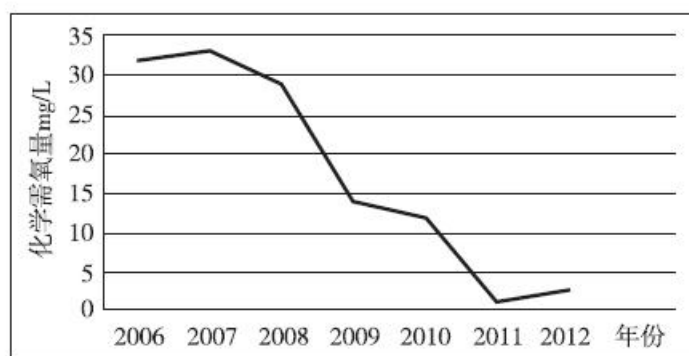


图 12 化学需氧量在不同年份的变化

Fig. 12 The change trend of total phosphorus, total nitrogen and chemical oxygen demand in Hongfeng Lake

3.1.4 红枫湖蓝藻水华在不同年份的暴发程度(图 13)

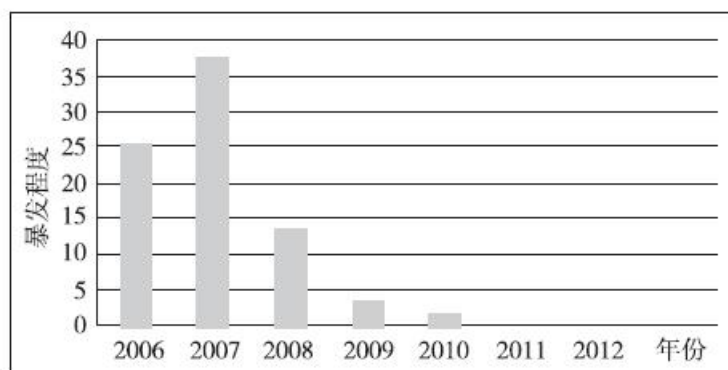


图 13 红枫湖蓝藻水华在不同年份的暴发程度

Fig. 13 Severity of algal bloom in Hongfeng Lake in different years

3.1.5 影响红枫湖水华形成的关键因子分析

水华的发生与水体生态系统中分布的浮游藻类种类、满足生长所需的营养物质、大量聚集生长时的环境气候条件等因素密切相关。

3.1.5.1 铜绿微囊藻的生长、繁殖和生物学特点

铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)是蓝藻门、色球藻目、色球藻科、微囊藻属的一个种，主要在淡水中生长，在温暖和含有机物较多的碱性水体中较多，成为淡水中重要的浮游植物。它的细胞结构简单，只具原始核，没有核膜和核仁，没有色素体，色素均匀地散在细胞周围的原生质内，只具叶绿素，没有叶绿体。繁殖方法简单，以营养细胞分裂为主，无性生殖。

铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)的特点:单细胞水生生物、群体聚集、浮游、个体小、世代周期短、无性生殖，在合适的条件下，短时间内可产生大量的个体。

3.1.5.2 温度与光照

通过调查走访和野外观测，红枫湖水华发生的时间为每年的3—5月和9—10月，晴天且气温高时，先少量零星的出现将军湾、红枫水产公司、滴澄关码头、兴隆半岛和苗寨等库湾，气温在30—31℃时爆发，逐渐扩散至全湖。雨天和气温低时，水华很少发生。根据观察现象并结合相关资料分析，温度和光照对红枫湖蓝藻水华的形成起了重要作用。

3.1.5.3 风向与水流

对红枫湖库湾零星水华的观察，由于微风吹动，产生风浪和湖流的运动将湖区内的蓝藻吹向湖岸，受湖岸阻挡并在附近慢慢聚集，达到一定数量后形成水华。同时，库湾附近较浅，水浪与湖岸碰撞及扰动，导致了大量的营养盐从沉积物中释放出来，为水体中蓝藻生长提供了许多可利用的营养盐含量。初步判断风向与水流的运动对红枫湖蓝藻水华的形成起了重要作用。

3.1.5.4 水体 pH 值

研究表明,弱碱性水体有利于水华的浮游藻类生长与繁殖,如 pH 值为 8—9 时铜绿微囊藻繁殖最快。项目的水质检测结果也表明,红枫湖 2006 年—2010 年发生水华时, pH 值均为 8—9。

3.1.5.5 红枫湖蓝藻水华生长需要的营养物质

据资料研究,影响藻类生长的物理、化学和生物因素(如阳光、营养盐类、季节变化、水温、pH 值,以及生物本身的相互关系)是极为复杂的,很难预测藻类生长的趋势,普遍认为氮、磷等营养物质浓度升高,是藻类大量繁殖的原因,其中又以磷为关键因素。关于水体富营养化的判断依据,还没有形成统一的标准,目前一般采用的指标是:水体中氮含量超过 0.2—0.3mg/L,生化需氧量大于 10mg/L,磷含量大于 0.01—0.02mg/L, pH 值 7—9 的淡水中细菌总数每毫升超过 10 万个,表征藻类数量的叶绿素-a 含量大于 0.01mg/L 时,水体达到富营养化程度,藻类能快速的增长和大量繁殖。

为判断红枫湖蓝藻水华发生与湖泊无机盐和营养物质间的关系,项目组到相关单位收集了 2006 年—2010 年红枫湖大坝和库区中间水样检测数据(表 1),并于 2011 年和 2012 年在滴沱关码头、苗寨和将军湾三个点采集水样进行检测(表 2 和表 3)。把 2006 年—2012 年红枫湖水样检测指标与水体富营养化评价的一般指标对照,2006 年—2010 年红枫湖水体中总氮、总磷和生化需氧量均高于富营养化评价的一般指标,2006 年和 2007 年最高,总体呈下降趋势(图 10—12), pH 值 8—9; 2011 年红枫湖水体中仅总氮高于富营养化评价的一般指标,2012 年仅总氮和叶绿素高于富营养化评价的一般指标,两年的总磷和生化需氧量均低于富营养化评价的一般指标, pH 值 7—8。通过对红枫湖水华的调查(图 13),从 1994 年以来,红枫湖每年都会出现大面积的“水华”现象,其中 2005 年—2007 年暴发的蓝藻水华影响最深,危害较大,直接导致居民饮用水困难; 2009 年和 2010 年仅在库湾有零星水华出现,2011 年和 2012 年未出现蓝藻水华。红枫湖水华的出现(图 13)与水质检测的数据(图 10—12)的变化趋势相互吻合,并与水体中总磷的含量呈现高度的正相关关系。据此判断红枫湖水体的富营养化程度和氮、磷等营养物质浓度对蓝藻的生长和水华的形成起了重要作用。

3.1.6 红枫湖蓝藻水华的成因

内因:铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)是单细胞水生生物、群体聚集、浮游、个体小、世代周期短、无性生殖,再加上对高温、低光强和紫外线的适应,可以过量摄取无机碳和营养物质,短时间内可产生大量的个体。

外因:水体理化指标达到或超过水体富营养化的一般标准、适宜生长的温度、光照、微风、水流和库湾的静水堆积。

蓝藻的大量生长:蓝藻+光照+温度+合适环境。

蓝藻水华形成:大量蓝藻+水文气象条件+合适环境

危害:影响水质和生态系统结构与功能。局部湖区蓝藻水华堆积就会影响人的生活环境,大量堆积与食物链传递就会危及人的健康与生存。

3.2 红枫湖蓝藻水华的控制途径

根据铜绿微囊藻的自身特点、生长繁殖和水华成因分析,红枫湖蓝藻水华控制途径总结如下:

改变生长环境:改变有利于蓝藻生长的环境,控制点污染源和面污染源,限制外源营养盐排入,去除湖内营养盐,生态调水,促进湖泊水体流动,降低湖泊水体温度。

-
- 1) 制定红枫湖水库管理法律法规，加大宣传力度，提高民众对红枫湖水库保护的意识和保护意识。
 - 2) 排查清理，对沿岸污染严重的工矿企业，采取关、停、并、转，减少点源污染。
 - 3) 严格执法，敦促相关工矿企业达标排放。
 - 4) 调整沿湖产业结构，重新规划和布局沿岸的种、养殖业，加强废弃物管理，减少化肥、农药等造成的面源污染。
 - 5) 推广废弃物综合利用的新技术，实现无污染排放，从源头上杜绝水体污染源。
 - 6) 在湖泊沿岸与污水处理厂之间建立一定区域的人工湿地，在入湖口区域形成一个生态防护带，降低入湖的氮磷量。

控制蓝藻生长:直接杀藻，化学药剂，物理作用，生物摄食。

1) 化学方法:杀藻剂或絮凝剂。要求:高效、毒性较小或无毒、无污染、无腐蚀，成本低，生产及运输安全，投药方便。硫酸铜杀灭蓝藻:明矾、石灰、三氯化铁絮凝藻类、敌草隆、西玛津、改性粘土(有机改性或者无机改性)沉降。

2) 物理方法:清除底泥，采用机械设备清除底泥将富含高浓度营养物的底泥层除去，可以有效去除内源营养物，控制藻类生长;曝气复氧，利用机械搅动、曝气和虹吸作用增加水体的流动性，防止水华的形成。其它物理方法还有过滤—局部湖区的机械捞藻、超声波—粉碎蓝藻细胞、放射线—杀灭蓝藻细胞、电磁电场—影响细胞的活性。

3) 生物相互作用:调节生态系统的结构，建立人工复合植物群落，由挺水植物芦苇(*Phragmites communis*)、石菖蒲(*Acorus calamus*)、喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)、陆生(浮床)植物美人蕉(*Canna*) (矮性品种)和沉水植物金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)等组成;放养吃藻的滤食性鲢、鳙鱼类;增加吃藻的浮游动物。通过溶藻微生物直接侵袭蓝藻细胞。

蓝藻水华暴发的临时应急措施:

- 1) 去除:通过拦截来保护重点水域，投放粘土沉降藻类，机械捞藻。
- 2) 改变环境:调水降温，加速水体流动和稀释藻类，人工降雨，降温减缓藻类生长。

参考文献【REFERENCES】

- [1] 庞磊，庞增轻. 红枫湖、百花湖水体污染事件调查 [J]. 环保科技, 2007, 13(3):44-48.
- [2] 张觉民，向志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册 [M]. 北京:农业出版社, 1991:12-170.
- [3] 胡鸿钧，魏印心. 中国淡水藻类:系统、分类及生态 [M]. 北京:科学出版社, 2006.
- [4] 王家楫. 中国淡水轮虫志 [M]. 北京:科学出版社, 1961:1-288.
- [5] 周凤霞，陈剑虹. 淡水微型生物图谱 [M]. 北京:化学工业出版社, 2004:193-358.

-
- [6] 蒋燮治, 堵南山. 中国动物志节肢动物门甲壳纲淡水枝角类 [M]. 北京:科学出版社, 1979:1-297.
- [7] 大连水产学院. 淡水生物学(上册) [M]. 北京:农业出版社, 1983:124-181.
- [8] 章家涉, 黄洋飞. 淡水浮游生物研究方法 [M]. 北京:科学出版社, 1991:358-387.
- [9] 谢平. 太湖蓝藻的历史发展与水华灾害 [M]. 北京:科学出版社, 2008.
- [10] 李媛, 张家卫, 魏杰, 等. 我国蓝藻水华的发生机理、危害及防控利用研究进展[J]. 微生物学杂志, 2015, 35(4):93-97.
- LI Y, ZHANG J W, WEI J, et al. Advances in mechanism of the occurrence, hazard, and prevention /control utilization of cyanophytic blooms in China [J]. Journal of Microbiology, 2015, 35(4) : 93-97.
- [11] 陈识文, 毛涛, 袁科平, 等. 水华治理方法研究进展 [J]. 长江大学学报(自然科学版), 2014, 11(35):69-73.
- [12] 姚玲爱, 许振成, 赵学敏, 等. 高州水库水华优势种铜绿微囊藻生长特性研究 [J]. 中国环境科学, 2013, 33(S1):191-197.
- YAO L A, XU Z C, ZHAO X M, et al. Growth characteristics of a dominate species in cyanobacterial bloom of Gaozhou reservoir, *Mycrocystis aeruginosa* [J]. China Environmental Science, 2013, 33(S1) : 191-197.
- [13] 田泽斌, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾夏季蓝藻水华成因研究 [J]. 中国环境科学, 2012, 32(11):2083-2089.
- TIAN Z B, LIU D F, YANG Z J, et al. Cyanobacterial bloom in Xiangxi bay, three gorges reservoir [J]. China Environmental Science, 2012, 32(11) : 2083-2089.
- [14] 许倩倩, 吕乐, 陈建, 等. 利用小球藻 USTB-01 控制蓝藻水华污染研究 [J]. 现代化工, 2010, 30(2):334-337.
- XU Q Q, LV L, CHEN J, et al. Control of cyanobacterial bloom pollution by *Chlorella* USTB-01 [J]. Modern Chemical Industry, 2010, 30(2) : 334-337.
- [15] 赵孟绪, 韩博平. 汤溪水库蓝藻水华发生的影响因子分析 [J]. 生态学报, 2005, 25(7):1554-1561.
- ZHAO M X, HAN B P. Analysis of factors affecting cyanobacteria bloom in a tropical Tangxi reservoir [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(7) : 1554-1561.
- [16] 张晓峰, 孔繁翔, 曹焕生, 等. 太湖梅梁湾水华蓝藻复苏过程的研究 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(7):1346-1350.
- ZHANG X F, KONG F X, CAO H S, et al. Recruitment dynamics of bloom-forming cyanobacteria in Meiliang bay of Taihu lake [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(7) : 1346-1350.