

三峡水库运行初期小江回水区藻类群落季节变化特点

郭劲松, 盛金萍, 李哲, 高旭, 方芳, 周红

(重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘要: 根据对三峡小江(澎溪河)回水区2007年5月~2008年5月藻类的跟踪观测, 分析了在水库蓄水运行初期小江回水区藻类的群落结构组成和演替特点. 结果发现藻类的细胞密度和生物量春季最高, 冬季最低, 细胞密度的最高值达到 $421.64 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 而最低值只有 $2.06 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$; 生物量的最高值是 $39\,231.84 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 而最低值为 $226.17 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 从2007年5月~2008年5月在小江共鉴定出藻类7门, 101属, 262种, 其中绿藻51属占50.5%、硅藻22属占21.8%、蓝藻18属占17.8%, 此外, 甲藻4属、隐藻2属、裸藻3属、黄藻及其他1属. 隐藻、小球藻、小环藻、栅藻、卵囊藻、衣藻、弓形藻、直链藻、冠盘藻和针杆藻是小江回水区段的常见藻属. 星杆藻、直链藻、空星藻、小球藻、栅藻、集星藻、网球藻、鱼腥藻、束丝藻、平裂藻、角甲藻、多甲藻和隐藻等12个藻属是小江回水区不同季节的优势藻属.

关键词: 三峡水库; 小江回水区; 藻类群落; 季节变化; 优势藻

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)07-1492-06

Seasonal Variation of Phytoplankton Community in Xiaojiang Backwater Area During the Preliminary Operation Stage of the Three Gorges Reservoir

GUO Jing-song, SHENG Jin-ping, LI Zhe, GAO Xu, FANG Fang, ZHOU Hong

(Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: According to one year's continuous observation on algae in the Xiaojiang backwater area in Three Gorges Reservoir, our group analyzed algae community and its succession in the Xiaojiang backwater area at the beginning of the function of the reservoir. The algae cell density and biomass are the highest in spring and the lowest in winter. The maximal value of cell density is $421.64 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, and the minimal value is $2.06 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$; and maximal value of biomass is $39\,231.84 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, and the minimal value is $226.17 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. From May 2007 to May 2008, there are 7 phylum, 101 category, 262 genus appeared in the Xiaojiang backwater area, in which 51 categories are *Chlorophyta* accounting for 50.5%, 22 categories are *Bacillariophyta* accounting for 21.8%, 18 categories are *Cyanophyta* accounting for 17.8%, and 4 categories are *Dinophyta*, 2 categories are *Cryptophyta*, 3 categories are *Euglenophyta*, 1 category is *Xanthophyta* and others. *Cryptomonas*, *Chlorella*, *Cyclotella*, *Scenedesmus*, *Oocystis*, *Chlamydomonas*, *Schroederia*, *Aulacoseira*, *Stephanodiscus* and *Fragilaria* are familiar categories in the Xiaojiang backwater area. *Asterionella*, *Aulacoseira*, *Coelastrum*, *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Aclinastrum*, *Dictyosphaerium*, *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Merismopedia*, *Ceratium*, *Peridinium* and *Cryptomonas* are the preponderant categories in the Xiaojiang backwater area.

Key words: Three Gorges Reservoir; Xiaojiang backwater area; phytoplankton community; seasonal variation; preponderant species of algae

三峡水库蓄水以来, 库区支流回水区段富营养化和水华问题备受关注. 藻类是水中最主要的初级生产者, 其某些种属在水体中迅速生长并繁盛被认为是水体富营养化的生物学标志之一^[1]. 已有学者对库区某些支流藻类群落特点进行过跟踪观测^[2,3], 亦有研究对水华敏感期的藻类群落丰度及其结构组成进行分析和评价^[4,5]. 然而, 三峡水库由135 m、145 m、156~172 m(试验性)水位的蓄水过程中, 不同类型水域的水动力条件、光热条件、营养状态等藻类生境要素各不相同, 其藻类群落丰度、结构组成、季节演替过程等特征亦表现出差异性^[6], 同时, 由于藻类群落的季节演替过程具有时空上的连续性, 目前仅对特定时段、区段的采样分析可能并不能反映库区支流回水区藻类群落的年际特征, 亦

难以从季节过程的角度阐释水华暴发时特征藻种的潜伏性特点^[7]. 因此在年际时间尺度下对三峡支流回水区藻类群落季节演替过程进行跟踪观测, 对于更清晰地认识其藻类对生境变化的生态响应特征进而阐释富营养化问题并对水华进行防范具有重要的意义.

课题组自2006年底水库完成156 m蓄水开始, 每月2次地对三峡小江回水区藻类群落特征进行定位跟踪监测. 本研究根据2007年5月~2008年5月

收稿日期: 2009-09-21; 修订日期: 2010-01-04

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07104-002, 2009ZX07104-005); 重庆市科技攻关计划重点项目(CSTC2008AB7036)

作者简介: 郭劲松(1963~), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水污染控制与治理, E-mail: guo0768@126.com

小江回水区藻类生物量、细胞密度和物种组成的监测结果,对水库运行初期(145~156 m)藻类群落季节演替过程进行分析和讨论,以期为进一步分析藻类群落演替的生态响应特征提供基础。

1 材料与方法

1.1 采样点的布置

小江流域(亦称澎溪河,见图1),位于北纬 $30^{\circ}49' \sim 31^{\circ}42'$,东经 $107^{\circ}56' \sim 108^{\circ}54'$ 之间,流域面积 $5\,173\text{ km}^2$,干流全长 182 km ,是三峡库区中段、北岸流域面积最大的次级河流。本研究沿小江流域 145 m 水位以下回水区段(全长约 40 km)设置5个采样断面(图1):渠马渡口($N31^{\circ}07'50.8''$, $E108^{\circ}37'13.9''$)、高阳平湖($N31^{\circ}5'48.2''$, $E108^{\circ}40'20.1''$)、黄石镇($N31^{\circ}00'29.4''$, $E108^{\circ}42'39.5''$)、双江大桥($N30^{\circ}56'51.1''$, $E108^{\circ}41'37.5''$)、小江河口($N30^{\circ}57'03.8''$, $E108^{\circ}39'30.6''$),各断面采样点位于河道深泓线处,采样频率为每月2次,平均间隔时间 15.3 d 。

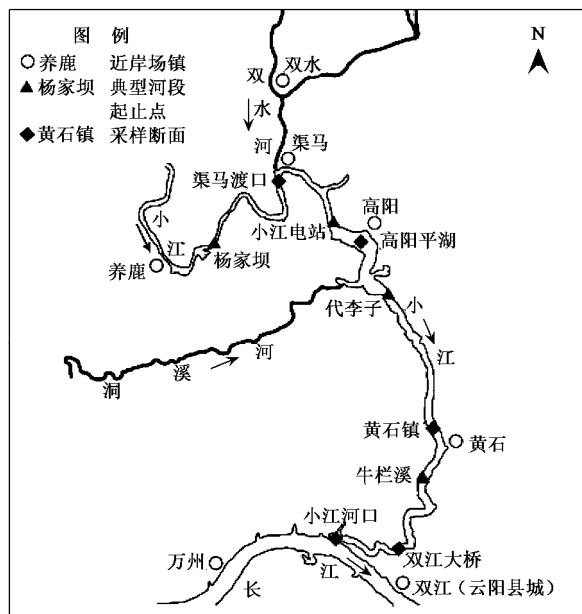


图1 小江养鹿-河口段回水区示意和采样点分布

Fig. 1 Map of backwater area and sampling spots

1.2 采样、监测和数据分析方法

藻类定性样品采集,采用25号藻类网在水面下作“∞”型捞取,现场用甲醛固定^[8,9],在光学显微镜(10×40)下鉴定藻种,藻类种类鉴定参考文献^[10, 11]进行,其中硅藻种类的鉴定根据文献^[12]提供的方法进行预处理;定量样品则用采水桶采集水深

$0.5、1、2、3、5、8\text{ m}$ 处共6个测点的水样^[13],现场滴加适量鲁哥试剂,回实验室后取6个测点的混合水样 1 L ,静置 48 h 浓缩,用藻类计数框在光学显微镜(10×40)下观察并对各藻种进行计数,然后按照相关公式换算藻类的细胞密度及生物量^[12],藻种鉴定、计数至种,但本研究中数据整理统计至属^[14]。

所有数据均录入SPSS®进行相关统计分析。根据全年气温、水温变化情况并参照重庆地区季节变化规律^[15,16],研究期间季节情况划分为:春季3~5月上旬;夏季5月中旬~9月中旬;秋季9月下旬~11月下旬;冬季12月~次年2月。

2 结果与分析

2.1 细胞密度与生物量的季节变化特点

2007年5月~2008年5月期间,小江回水区5个采样点藻类细胞密度(CellD)和藻类生物量(BioM,湿重,下同)均值分别为 $(38.942 \pm 10.556) \times 10^5\text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(5\,832 \pm 1\,190)\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。对∞样点间的藻类细胞密度和藻类生物量进行分析(图2、图3和表1),发现小江回水区5个采样点间的藻类细胞密度和藻类生物量无显著统计差异;5个采样点间的藻类细胞密度和藻类生物量季节变化过程同步。基于上述的无差异性和同步性,本节着重对研究期间小江回水区藻类细胞密度和藻类生物量的季节变化过程进行分析探讨。

2007年5月小江回水区发生了固氮型蓝藻水华^[7],小江回水区藻类细胞密度和生物量均达到较高水平,∞样点细胞密度和生物量均值分别为 $(49.597 \pm 8.396) \times 10^5\text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(13\,476 \pm 2\,596)\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,但入夏后受降雨、径流的影响其值缓慢下降,至2007年夏末(8月下旬~9月)小江回水区藻类细胞密度和生物量均值分别降至 $(18.507 \pm 2.510) \times 10^5\text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(2\,602 \pm 270)\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。小江回水区藻类细胞密度和生物量在10月下旬较10月上旬出现短期的显著跃升,期间二者均值分别为 $(34.988 \pm 2.398) \times 10^5\text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(1\,567 \pm 177)\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,但却在11月下旬骤然下降,并伴随冬季的开始而相对稳定地维持在较低的水平。2007年11月~2008年1月,小江回水区藻类细胞密度和生物量均值分别仅为 $(2.943 \pm 0.244) \times 10^5\text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(329 \pm 30)\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,是研究期间的最低水平。2008年冬末初春,小江回水区藻类细胞密度和生物量开始迅速升高,2月下旬二者均值分别达到 $(39.377 \pm 5.928) \times 10^5\text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 和

表 1 研究期间小江回水区藻类细胞密度和藻类生物量季节变化¹⁾

Table 1 Seasonal variations of algal cell density and biomass in XBA

项目	参数	2007-05 ~ 2008-05 (n = 125)	春季 (n = 30)	夏季 (n = 40)	秋季 (n = 25)	冬季 (n = 30)
藻类细胞密度	均值	38.94 ± 10.56	38.828 ± 5.56	74.25 ± 32.05	18.79 ± 2.48	8.781 ± 2.70
	变幅	0.977 ~ 1 167.570	1.233 ~ 1 167.570	4.84 ~ 97.12	3.000 ~ 40.325	0.977 ~ 55.419
	C _v	0.27	0.14	0.43	0.13	0.31
藻类生物量	均值	5 831.65 ± 1 190.57	10 017.88 ± 1 943.45	8 938.58 ± 3 255.97	1 727.64 ± 207.24	922.86 ± 273.52
	变幅	76 ~ 120 515.9	236.046 ~ 120 515.9	544.419 ~ 28 121.510	364.791 ~ 4 657.07	76.217 ~ 5 546.047
	C _v	0.20	0.19	0.36	0.12	0.30

1) 藻类细胞密度单位: $\times 10^5 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$; 藻类生物量(以湿重计)单位: $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; C_v 为变异系数; n 为样本数

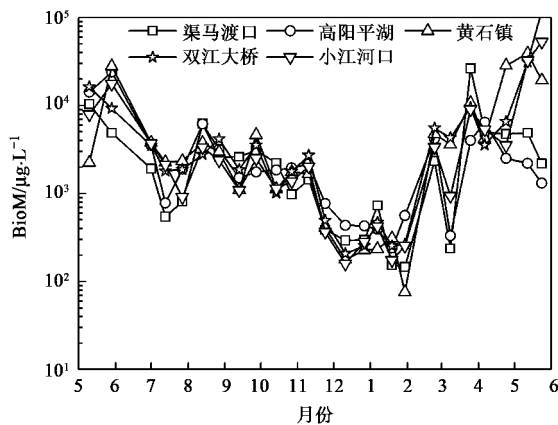


图 2 藻类细胞密度季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of alga cell density

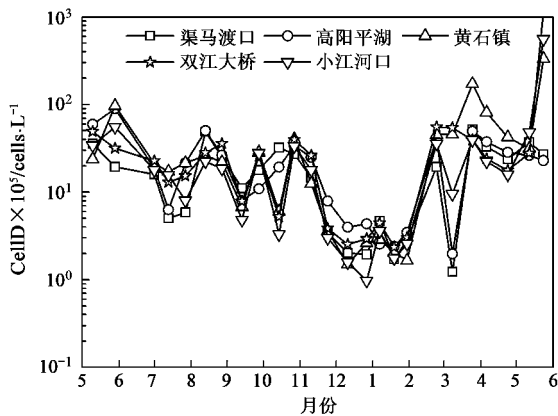


图 3 藻类生物量季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of alga biomass

($4\,045 \pm 552$) $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 入春后,小江回水区藻类细胞密度和生物量表现出波动振荡的特点,但总体呈增加的趋势. 2008 年 3 月,小江回水区藻类细胞密度和生物量较 2 月下旬显著下降,均值分别为 (11.769 ± 5.774) $\times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 ($1\,042 \pm 444$) $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,但从 3 月下旬则迅速陡升至 (33.549 ± 15.261) $\times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 ($5\,610 \pm 2\,444$) $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 虽然小江回水区藻类细胞密度和生物量

在 4 月上旬略有下降,但在 4 月中旬起持续升高,并在 4 月下旬 ~ 5 月水华暴发期间达到全年最高水平,期间藻类细胞密度和生物量均值为 (115.432 ± 60.099) $\times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 ($16\,861 \pm 6\,215$) $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.

总体上,研究期间小江回水区藻类群落丰度(用细胞密度或生物量表示群落丰度)在冬末春初和春夏之交较高,而在冬季则相对较低. 根据相关研究^[17,18],藻类细胞密度和生物量分别小于 $3 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 ($1\,000 \sim 1\,500$) $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的水体为贫营养型,分别介于 ($3 \times 10^5 \sim 10 \times 10^5$) $\text{cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 ($1\,500 \sim 5\,000$) $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 为中营养型,分别大于 $10 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 ($5\,000 \sim 10\,000$) $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的为富营养型. 以藻类群落丰度划分营养状态,在研究期间的 125 个样本中,从细胞密度上看,分别有 16% 属于贫营养状态,19.2% 属于中营养状态,而 64.8% 属于富营养状态;而从生物量上看,贫营养、中营养和富营养的比例分别为 36.8%、43.2% 和 20%. 因此,小江回水区总体呈中-富营养状态,但冬季藻类细胞密度和生物量处于较低水平,此时水体处于贫营养状态;在春季水华高发期,小江回水区处于富营养化状态.

2.2 藻类群落属种组成特点

研究期间,小江回水区共鉴定出藻类 7 门,101 属,262 种,其中绿藻 (*Chlorophyta*) 51 属、硅藻 (*Bacillariophyta*) 22 属、蓝藻 (*Cyanophyta*) 18 属、甲藻 (*Dinophyta*) 4 属、隐藻 (*Cryptophyta*) 2 属、裸藻 (*Euglenophyta*) 3 属、黄藻 (*Xanthophyta*) 及其他 1 属. 各藻门相对丰度季节变化见图 4. 从细胞密度上看(表 2),蓝藻在水温逐渐升高的春季达最高值,夏季到秋季逐渐降低,冬季出现较少;绿藻一年四季都有较高的细胞密度,最高值出现在秋季;硅藻是耐低温的藻种,其细胞密度峰值出现在冬季,但在一年中都有生长;甲藻、隐藻、裸藻及其他藻类的细胞密度

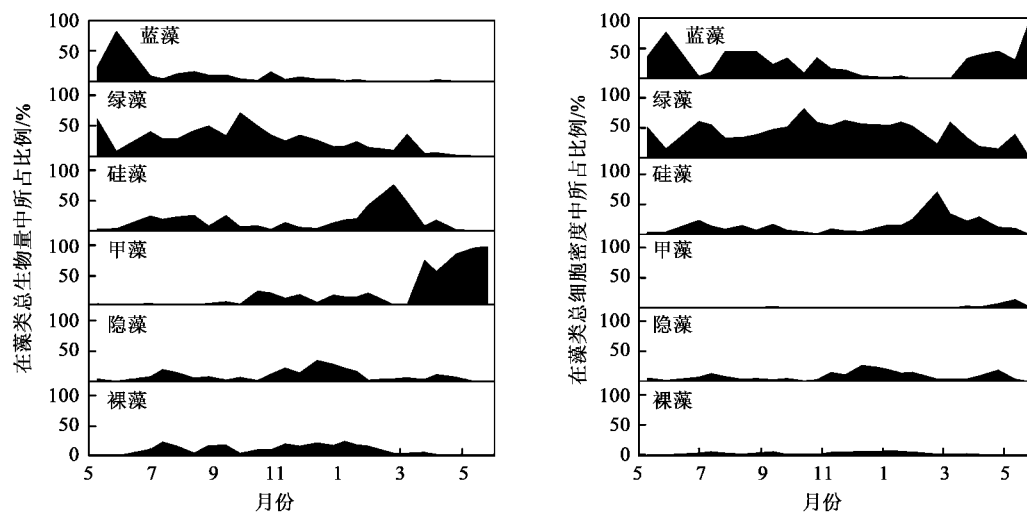


图4 各门藻类的周年变化

Fig.4 Annual variation of alga cell density and alga biomass

表2 各门藻类的细胞密度和生物量的季节变化

Table 2 Seasonal variation of alga cell density and alga biomass

项目	全年 (n = 125)	春季 (n = 30)	夏季 (n = 40)	秋季 (n = 25)	冬季 (n = 30)
蓝藻细胞密度 $\times 10^5 / \text{cells} \cdot \text{L}^{-1}$	65.52 ± 136.64	30.14 ± 21.86	7.22 ± 6.58	4.46 ± 4.55	0.07 ± 0.04
蓝藻生物量 $/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	768.70 ± 2754.81	8067.80 ± 8099.29	320.86 ± 248.85	115.99 ± 87.22	6.64 ± 3.91
绿藻细胞密度 $\times 10^5 / \text{cells} \cdot \text{L}^{-1}$	12.67 ± 6.88	15.06 ± 8.57	8.98 ± 3.24	10.00 ± 6.54	2.78 ± 3.19
绿藻生物量 $/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	843.11 ± 1280.70	3868.42 ± 3378.62	1129.82 ± 656.54	792.26 ± 730.90	118.19 ± 149.94
硅藻细胞密度 $\times 10^5 / \text{cells} \cdot \text{L}^{-1}$	5.88 ± 5.31	2.02 ± 0.74	2.90 ± 1.82	0.99 ± 0.67	4.97 ± 11.20
硅藻生物量 $/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	489.74 ± 646.88	560.31 ± 275.92	585.61 ± 399.36	197.23 ± 151.49	565.41 ± 1238.99
甲藻细胞密度 $\times 10^5 / \text{cells} \cdot \text{L}^{-1}$	2.38 ± 3.03	0.28 ± 0.06	0.12 ± 0.05	0.10 ± 0.07	0.02 ± 0.01
甲藻生物量 $/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	3280.62 ± 8643.52	397.66 ± 56.91	105.34 ± 58.15	217.42 ± 123.93	57.21 ± 30.52
隐藻细胞密度 $\times 10^5 / \text{cells} \cdot \text{L}^{-1}$	2.29 ± 1.49	1.67 ± 0.88	1.32 ± 0.13	0.99 ± 1.02	0.71 ± 0.47
隐藻生物量 $/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	231.42 ± 178.25	333.63 ± 176.22	263.26 ± 25.11	169.78 ± 159.61	88.09 ± 69.04
裸藻细胞密度 $\times 10^5 / \text{cells} \cdot \text{L}^{-1}$	0.43 ± 0.50	0.39 ± 0.14	0.63 ± 0.15	0.39 ± 0.23	0.23 ± 0.18
裸藻生物量 $/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	216.00 ± 185.73	230.70 ± 106.23	370.00 ± 118.13	219.81 ± 121.82	87.31 ± 65.72

较小,在一年中的变化也较平缓.从生物量上看,蓝藻、绿藻、硅藻、隐藻、裸藻及其它藻类的生物量季节变化与细胞密度的变化基本一致.其中甲藻的生物量在2008年的春季出现了明显峰值,这段时间小江回水区暴发了甲藻水华,由于甲藻单个细胞体积比较大,在细胞密度的提高不是很显著的情况下,生物量有了大幅度增加.

2.3 常见藻与优势藻的季节演替

如图5所示,研究期间小江回水区常见藻属主要有:隐藻(*Cryptomonas*),其在采样中的出现频次为98.4%(下同)、小球藻(*Chlorella*)97.6%、小环藻(*Cyclotella*)97.6%、栅藻(*Scenedesmus*)88.0%、卵囊藻(*Oocystis*)84.8%、衣藻(*Chlamydomonas*)80.0%、弓形藻(*Schroederia*)77.6%、直链藻

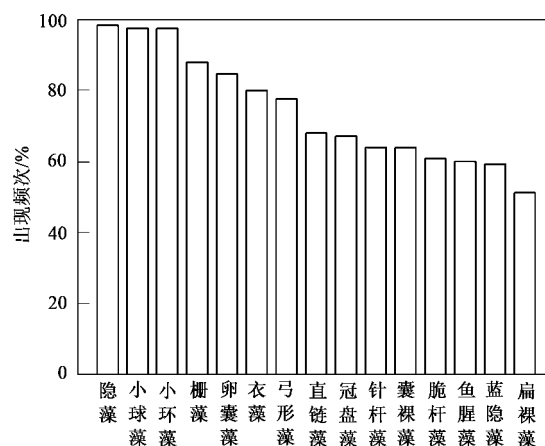


图5 常见藻属出现频次

Fig.5 Frequency of emergence of the common alga

(*Aulacoseira*) 68.0%、冠盘藻(*Stephanodiscus*) 67.2%、针杆藻(*Fragilaria*) 64.0%、囊裸藻(*Trachelomonas*) 64.0%、脆杆藻(*Fragilaria*) 60.8%、鱼腥藻(*Anabaena*) 60.0%、蓝隐藻(*Chroomonas*) 59.2%、扁裸藻(*Phacus*) 51.2%。这些藻属^[19]均以浮游生活为主,对环境的适应性较强,是营养较丰富的湖泊、缓流或静止水体的常见藻属,在淡水中分布极为广泛。其中,隐藻喜生于有机物和氮丰富的水体,适应性极强,无论夏季和冬季均可形成优势种群;小环藻亦可在一年四季形成优势种群;栅藻分布极广,繁殖迅速,适应性强;衣藻在早春晚秋最为繁盛;鱼腥藻在春末、夏初、初秋时,易形成“水华”,是水体富营养化的标志^[20-22]。

研究期间,小江回水区优势藻的季节演替十分显著。在藻类生态学中,优势藻定义为:在初级生产力中贡献最大的藻种,是指对于群落中其他种类有很大影响,而本身受其他种类影响最小的种类^[23],我国国家标准将其定义为:具有控制群落和反映群落特征、数量上所占比例最多的种类^[24]。而在实际评判中不少研究使用生物量或细胞密度的相对丰度值判定优势藻^[25,26]。本研究分别根据生物量和细胞密度的相对丰度大小,分析小江回水区的优势藻属演替过程。

2007年5月小江回水区暴发蓝藻水华,优势藻为鱼腥藻和束丝藻(*Aphanizomenon*),微囊藻(*Microcystis*)和空星藻(*Coelastrum*)亦占较大比重。入夏后,随着蓝藻水华消亡,绿藻、隐藻、裸藻Ⅱ始大量增殖,平裂藻(*Merismopedia*)、栅藻、小球藻、集星藻(*Aclinastrum*)、卵囊藻、隐藻、空星藻、囊裸藻、鱼腥藻和束丝藻等成为小江回水区夏季常见的优势藻。夏末开始,温度下降诱使硅藻开始在水层中出现。秋季小江回水区优势藻主要有:直链藻、角甲藻(*Ceratium*)、空球藻(*Eudorina*)、实球藻(*Pandorina*)、网球藻(*Dictyosphaerium*)、空星藻、小球藻、栅藻、隐藻(*Cryptomonas*)、裸藻(*Euglena*)、扁裸藻、囊裸藻、微囊藻、平裂藻、鱼腥藻、束丝藻、假鱼腥藻。冬季水温进一步降低,耐低温的硅藻逐渐占据优势,此时的优势藻主要是星杆藻(*Asterionella*)、直链藻、小球藻、卵囊藻、栅藻、蓝隐藻、隐藻、角甲藻、扁裸藻。2008年春季在小江回水区占优势的藻种从初春的硅藻逐步演替为蓝藻和甲藻,由初春时的直链藻、星杆藻、集星藻、实球藻、栅藻,逐步演替为鱼腥藻、微囊藻、色球藻、多甲藻(*Peridinium*)、角甲藻、实球藻、小环藻、隐藻。

以生物量计,小江回水区优势藻演替过程如下:鱼腥藻、束丝藻、空星藻→隐藻、集星藻、空星藻、囊裸藻、鱼腥藻、束丝藻→直链藻、角甲藻、空球藻、实球藻、网球藻、空星藻、隐藻、裸藻、扁裸藻、囊裸藻→星杆藻、直链藻、隐藻、角甲藻、扁裸藻→直链藻、星杆藻、栅藻,多甲藻、角甲藻、隐藻。

以细胞密度计,小江回水区优势藻演替过程如下:鱼腥藻、微囊藻、束丝藻→平裂藻、栅藻、小球藻、集星藻、卵囊藻、隐藻→网球藻、小球藻、空星藻、栅藻、微囊藻、平裂藻、鱼腥藻、束丝藻、假鱼腥藻(*Pseudanabaena*)、隐藻→星杆藻、直链藻、小球藻、卵囊藻、栅藻、蓝隐藻→直链藻、星杆藻、集星藻、实球藻、鱼腥藻、微囊藻、色球藻(*Chroococcus*)、实球藻、小环藻。

一年观测的统计结果,小江回水区各采样点的优势藻表现出明显的季节演替现象。从各季节的藻类演替过程可以看出,秋季是优势藻种类最多的时间段,而春季最少,其中星杆藻、直链藻、空星藻、小球藻、栅藻、集星藻、网球藻、鱼腥藻、束丝藻、平裂藻、角甲藻、多甲藻和隐藻等12个藻属是小江回水区不同季节出现频次最大的优势藻。

春末夏初是小江回水区每年的水华高发期,2007年5月,鱼腥藻、束丝藻和微囊藻,无论是细胞密度还是生物量都占据了绝对优势,形成了一次大规模的蓝藻水华。接着2008年3月发生一次星杆藻水华,冬末春初温度回升的时间段,容易造成适宜于低温生长的硅藻门藻类(如星杆藻)疯长。2008年5月,小江回水区再次暴发水华,但由于水动力条件的改变等因素,水华优势藻以角甲藻和微囊藻为主,与前一年同期相比发生很大变化。

3 结论

(1)观测期间细胞密度和生物量季节变化明显,二者均在春季最高,冬季最低。细胞密度的最高值为 $421.64 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$,最低值为 $2.06 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$;生物量的最高值为 $39\,231.84 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,最低值为 $226.17 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

(2)研究期间,小江回水区共鉴定出藻类7门,101属,262种,其中隐藻、小球藻、小环藻、栅藻、卵囊藻、衣藻、弓形藻、直链藻、冠盘藻、针杆藻是出现频率最高的10个常见藻属。

(3)研究期间,小江回水区的优势藻种表现出明显的季节演替。星杆藻、直链藻、空星藻、小球藻、栅藻、集星藻、网球藻、鱼腥藻、束丝藻、平裂藻、角甲

藻、多甲藻和隐藻等 12 个藻属是小江回水区不同季节出现频次较大的优势种。

参考文献:

- [1] 周谐, 郑坚, 黄书铭, 等. 三峡库区重庆段浮游藻类调查及水质评价[J]. 中国环境监测, 2006, **22**(4): 70-73.
- [2] 况琪军, 周广杰, 胡征宇. 三峡库区藻类种群结构与密度变化及其与氮磷浓度的相关性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2007, **16**(2): 231-235.
- [3] Gao X L, Song J M. Phytoplankton distributions and their relationship with the environment in the Changjiang Estuary China [J]. Mar Pollut Bull, 2005, **50**: 327-335.
- [4] 郭劲松, 陈杰, 李哲, 等. 156 m 蓄水后三峡水库小江回水区春季浮游植物调查及多样性评价[J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2710-2715.
- [5] 周广杰, 况琪军, 胡征宇, 等. 三峡库区四条支流藻类多样性评价及“水华”防治[J]. 中国环境科学, 2006, **26**(3): 337-341.
- [6] 况琪军, 毕永红, 周广杰, 等. 三峡水库蓄水前后浮游植物调查及水环境初步分析[J]. 水生生物学报, 2005, **29**(4): 353-358.
- [7] 李哲, 方芳, 郭劲松, 等. 三峡小江回水区段 2007 年春季水华与营养盐特征[J]. 湖泊科学, 2009, **21**(1): 36-44.
- [8] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社出版, 2000. 142-144.
- [9] 沈韞芬, 章宗涉, 龚循矩, 等. 微型生物监测新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
- [10] 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.
- [11] 福迪·B 著, 罗迪安译. 藻类学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980. 17-20.
- [12] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游植物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991. 338-347.
- [13] 隋战鹰. 浮游藻类与水质污染监测[J]. 生物学通报, 2002, **37**(8): 49.
- [14] 方芳, 田光, 李哲, 等. 三峡小江回水区磷素赋存形态季节特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2009, **30**(12): 3488-3493.
- [15] 邱光胜, 涂敏, 叶丹, 等. 三峡库区支流富营养化状况普查[J]. 人民长江, 2008, **39**(13): 1-5.
- [16] 胡建林, 刘国祥, 蔡庆华, 等. 三峡库区重庆段主要支流春季浮游植物调查[J]. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 116-119.
- [17] Viličić D. Phytoplankton population density and volume as indicators of eutrophication in the eastern part of the Adriatic Sea [J]. Hydrobiologia, 1989, **174**: 117-132.
- [18] Thornton K W, Kimmel B L, Payne F E. Reservoir limnology: ecological perspective [M]. NY: John Wiley & Sons, 1990. 246.
- [19] 沈治蕊, 卞小红, 赵燕, 等. 南京熙园太湖富营养化及其防治[J]. 湖泊科学, 1997, **9**(4): 377-380.
- [20] Reynolds C S. What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status? [J]. Hydrobiologia, 1998, **369**(370): 11-26.
- [21] Padisák J, Crossetti L O, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates [J]. Hydrobiologia, 2009, **621**: 1-19.
- [22] Reynolds C S. Ecology of Phytoplankton [M]. UK: Cambridge University Press, 2006. 318-325.
- [23] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 77-98.
- [24] GB/T 12763. 9-2007, 海洋调查规范第 9 部分: 海洋生态调查指南[S].
- [25] 况琪军, 夏宜铮. 太平湖水库的浮游藻类与营养型评价[J]. 应用生态学报, 1992, **3**(2): 165-168.
- [26] 蔡庆华, 胡征宇. 三峡水库富营养化问题与对策研究[J]. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 7-11.