

龙江河春季浮游植物群落特征及其富营养化评价*

Phytoplankton Community Structure and Eutrophication of Longjiang River in Spring

夏新建¹, 邓渠成², 韦 锋¹, 许桂苹¹, 王晓飞^{1,3}, 邓超冰^{1**}

XIA Xinjian¹, DENG Qucheng², WEI Feng¹, XU Guiping¹, WANG Xiaofei^{1,3}, DENG Chaobing¹

(1. 广西壮族自治区环境监测中心站, 广西南宁 530028; 2. 澳大利亚国立大学克劳福德公共政策学院, 澳大利亚堪培拉 2600; 3. 广西大学轻工与食品工程学院, 广西南宁 530004)

(1. Guangxi Prefecture Environmental Monitoring Centre, Nanning, Guangxi, 530028, China; 2. Crawford School of Public Policy, Australian National University, Canberra, 2600, Australia; 3. Institute of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China)

摘要:【目的】针对 2013 年春季广西龙江河河段拉浪水库上游爆发的大规模大藻和水葫芦现象, 对龙江河流域的浮游植物进行调查。【方法】运用生物多样性指数和营养状态指数对龙江河的营养状态进行评价。【结果】本次调查浮游植物共镜检到 7 门 42 属 56 种(变种), 其中绿藻门和硅藻门的种类较多, 分别占镜检种类数的 37.50% 和 25.00%。龙江河流域中的拟多甲藻丰度水平最高, 其细胞密度为 $0.12 \times 10^6 \sim 5.13 \times 10^6$ cells \cdot L⁻¹, 其中糯米滩水电站的甲藻丰度占比高达 91.76%, 发生较严重的甲藻水华。龙江河流域的浮游植物多样性指数(H')为 0.68~2.99, 均匀度指数(J)为 0.18~0.48, 营养状态指数为 42.10~53.60。【结论】调查期间龙江河处于中营养和轻度富营养化水平。

关键词: 龙江河 富营养化 浮游植物 营养状态

中图分类号: X826 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2016)02-0150-06

Abstract: 【Objective】 To investigating the reason of overgrowth of *Pistia stratiotes* and *Eichhornia crassipes* in the spring of 2013, phytoplanktons were investigated in Lalang reservoir which located in upstream of Longjiang River. **【Methods】** Diversity indices (Shannon-Wiener diversity index and Pielou) and trophic state index were used to assess the trophic state of the Longjiang River. **【Results】** Totally, 7 phyla, 42 genera and 56 species of phytoplankton were identified, among them Bacillariophyta and Chlorophyta were the dominant taxa, and their relative abundances were 37.50% and 25.00%, respectively. However, the most abundant taxa was *Peridiniopsis* Lemmermann, and its cell density ranged from 0.12×10^6 to 5.13×10^6 cells \cdot L⁻¹. For example, the relative abundance of *Pyrrophyta* in Nuomitán station was 91.76%, indicating the dinoflagellate bloom. The biodiversity analysis showed that Shannon-Wiener diversity index ranged from 0.68 to 2.99, Pielou from 0.18 to 0.48, and the integrated trophic state index from 42.10 to 53.60. **【Conclusion】** In summary, the results indicated that the water quality of Longjiang River was classified as mesotrophic and eutrophic level.

Key words: Longjiang River, eutrophication, phytoplankton, trophic state

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20160512.002

收稿日期: 2016-01-30

修回日期: 2016-03-31

作者简介: 夏新建(1985-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事水生态环境监测与保护。

* 广西自然科学基金项目“西江流域水环境重金属污染机制与调控”(2013GXNSFEA053001)资助。

** 通讯作者: 邓超冰(1962-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事环境污染监测技术研究, E-mail: dc715@sina.com。

0 引言

【研究意义】浮游植物作为河流水生态系统中的重要组成部分,在水生态系统物质和能量转化中发挥重要作用,其群落结构特征与该区域水环境因子密切相关,其种类和数量会随着生态系统中某些环境因子的改变而改变,因此运用浮游植物群落结构特征变化来评价水域环境质量状况这一方法越来越受重视^[1]。目前国内外有大量的学者采用浮游植物的生物量、密度、种类、多样性等评价水体生态环境^[2],常用的水体富营养状况评价方法主要包括磷收支模型法、参数法、特征法、数学分析法和营养状态指数法以及比较新颖的3S(GIS;GPS;RS)技术等^[3-5]。【前人研究进展】龙江河作为珠江水系西江支流柳江的最大支流,是下游沿江城市的城市用水源头,其水质状况影响群众的用水安全,目前仅有赵学敏等^[6]针对龙江河水体的氮磷作过水质风险调查,而基于该流域水体生物的调查未见报道。【本研究切入点】2013年春季,龙江河河段拉浪水库上游大规模爆发大藻和水葫芦,为及时了解龙江河水体环境状况,本文对龙江河开展浮游植物群落结构特征调查。【拟解决的关键问题】运用生物多样性指数和综合营养状态指数对河段水体营养状况进行评价,以期掌握龙江河水生浮游植物的基本状况,为西江流域水环境评价和水资源保护提供依据。

1 材料与方法

1.1 采样点的设置

龙江河是珠江水系西江支流柳江的最大支流,流经广西河池市环江县、南丹县、金城江区、宜州市、柳州市柳江县,全长390 km,流域地区共1303 km²,流域约27万人。目前,在龙江河上已建成下桥,拔贡,六甲,肯足,拉浪,叶茂,洛东,三岔,糯米滩等多座梯级电站,部分电站坝上形成库区,致使龙江河湖库化现象越来越严重。

依据调查目的,2013年春季丰水期在龙江河上设置4个采样点位,分别为拉浪水电站上游的东江镇三江口、拉浪水电站、龙江河下游的洛东水电站,龙江河下游的糯米滩水电站(图1)。

1.2 样品采集与分析

浮游植物定性样品的采集:用孔径 $<30\ \mu\text{m}$ 的浮游生物网置于水面下50 cm处呈“∞”字形缓慢拖曳,网口与水面垂直,将获得的浓缩样用60 mL标本瓶收集后立即用适量的鲁歌氏液固定,带回实验室镜检。定量样品的采集则需在定性样品采集之前采集

1 L水样,装入广口采样瓶,加入1.5%(V/V)鲁歌氏液固定,带回实验室后摇匀并转移到1 L的分液漏斗,静置48 h后用虹吸法吸去上清液获得浓缩藻液,定容到30 mL镜检。

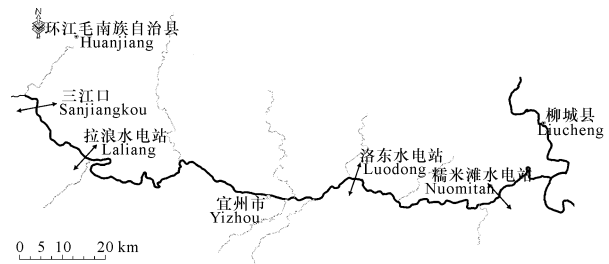


图1 龙江河采样点位

Fig. 1 Sampling site of Longjiang River

叶绿素a(Chl a)样品的采集:用1 L采样瓶采集水样,加入1 mL的碳酸镁溶液固定,现场用 $0.45\ \mu\text{m}$ 的纤维滤膜抽滤,抽滤后低温保存带回实验室反复冻融浸提,运用改进的丙酮萃取方法进行测定。

依据《水与废水监测分析方法》的要求同步采集水质化学样品,测定分析样品中溶解氧(DO)、总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和pH值。

1.3 评价方法

1.3.1 生物多样性指数

采用Shannon-Wiener指数(H')^[7]和物种均匀度指数(J)^[8]作为浮游植物群落结构的评价指数^[9]。Shannon-Wiener指数(H')^[10]: $H' = -\sum P_i \log_2 P_i$,物种均匀度指数(J)^[11]: $J = H'/H_{\max}$,式中 P_i 为第 i 种的个体数与总个体数的比值, H_{\max} 为 $\log_2 S$, S 为样品中总种类数。

1.3.2 综合营养状态指数法

以Chl a为基准参数,按照其它参数与Chl a的相关关系,赋予各参数不同权重,进行加权综合,将加权后的综合指数与营养状态分级标准对比,来判定湖泊的营养化程度。综合营养状态指数 $TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TLI(j)$, $TLI(j)$ 为第 j 种参数的营养状态指数, W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重。Chl a、TP、TN、SD和COD_{Mn}的营养状态指数计算公式如下: $TLI(\text{Chl a}) = 10 \times (2.5 + 1.086 \ln \text{Chl a})$; $TLI(\text{TP}) = 10 \times (9.436 + 1.624 \ln \text{TP})$; $TLI(\text{TN}) = 10 \times (5.453 + 1.694 \ln \text{TN})$; $TLI(\text{SD}) = 10 \times (5.118 - 1.94 \ln \text{SD})$; $TLI(\text{COD}_{\text{Mn}}) = 10 \times (0.109 + 2.661 \ln \text{COD}_{\text{Mn}})$ 。在基准参数Chl a下,第 j 种参数的营养状态指数的相关权重计算参照《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》中的方法。

本文采用表1的标准划分富营养化等级^[12]。

表 1 湖泊富营养化评价标准

Table 1 Eutrophication standard of lake

密度 Density ($\times 10^4$ cell · L ⁻¹)	多样性指数 Diversity indices (H')	均匀度 指数 Pielou (J)	叶绿素 a Chl a (mg · m ⁻³)	营养状态指数 Trophic state index TLI(Σ)	营养水平 Trophic level
<30	>3	0.5~0.8	<1	<37	贫营养型 Oligotrophic
30~100	1~3	0.3~0.5	1~5	37~50	中营养型 Mesotrophic
>100	<1	0.0~0.3	>5	>50	富营养型 Eutrophic

2 结果与分析

2.1 浮游植物分布特征

2.1.1 浮游植物的种类组成

如表 2 所示,本次所采集浮游植物样品共镜检到 7 门 42 属 56 种(变种),其中绿藻门和硅藻门的种类最丰富,绿藻门 17 属 21 种,占总数的 37.5%;硅藻门 11 属 14 种,占总数的 25.0%;蓝藻门 4 属 6 种,占总数的 10.7%;甲藻门 4 属 6 种,占总数的 10.7%;裸藻门 3 属 4 种,占总数的 7.1%;隐藻门 1 属 3 种,占总数的 5.3%;金藻门 2 属 2 种,占总数的 3.6%。甲藻门中的埃尔拟多甲藻 (*Peridiniopsis elpatiewskyi*) 丰度水平最高,其次是硅藻门中的颗

表 2 龙江河浮游植物种类组成

Table 2 The taxa composition of phytoplankton in Longjiang River

点位 Point	浮游植物常见种 The main dominant species of phytoplankton
三江口 Sanjiangkou	四足十字藻 (<i>Crucigenia tetrapedia</i>)、水绵 (<i>Spirogyra</i>)、针形纤维藻 (<i>Ankistrodesmus acicularis</i>)、二尾栅藻 (<i>Scenedesmus bicaudatus</i>)、四尾栅藻 (<i>Scenedesmus quadricauda</i>)、丝藻 (<i>Ulothrix</i>)、衣藻 (<i>Chlamydomonas</i>)、弓形藻 (<i>Schroederia</i>)、单角盘星藻 (<i>Pediastrum simplex</i>)、拟球藻 (<i>Nannochloropsis salina</i>)、小球藻 (<i>Chlorella vulgaris</i>)、四刺顶棘藻 (<i>Chodatella quadriseta</i>)、镰形纤维藻 (<i>Oscillatoria limosa</i>)、嗜蚀隐藻 (<i>Cryptomonas erosa</i>)、隐藻 (<i>Cryptomonas</i>)、埃尔拟多甲藻 (<i>Peridiniopsis elpatiewskyi</i>)、裸甲藻 (<i>Gymnodinium aerucyinosum</i> Stein)、多甲藻 (<i>Peridinium perardiforme</i>)、平板藻 (<i>Tabellaria</i>)、颗粒直链藻 (<i>Aulacoseira granulata</i>)、舟形藻 (<i>Navicula</i>)、脆杆藻 (<i>Frailaria</i>)、针杆藻 (<i>Synedra</i>)、桥弯藻 (<i>Cymbella</i>)、双菱藻 (<i>Surirella</i>)、小环藻 (<i>Cyclotella</i>)、星杆藻 (<i>Asterionella</i>)、裸藻 (<i>Euglena</i>)、扁裸藻 (<i>Phacus</i>)、锥囊藻 (<i>Dinobryon</i>)、鱼鳞藻 (<i>Mallomonas</i>)、颤藻 (<i>Oscillatoria</i>)、铜绿微囊藻 (<i>Microcystis aeruginosa</i>)、水华微囊藻 (<i>Microcystis flos-aquae</i> (Wittr. Kirchner)、拟柱孢藻 (<i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>)、束缚色球藻 (<i>Chroococcus tenax</i>)
拉浪水电站 Lalang	衣藻 (<i>Chlamydomonas</i>)、拟球藻 (<i>Nannochloropsis salina</i>)、四刺顶棘藻 (<i>Chodatella quadriseta</i>)、针形纤维藻 (<i>Ankistrodesmus</i>)、镰形纤维藻 (<i>Oscillatoria limosa</i>)、狭形纤维藻 (<i>Ankistrodesmus angustus</i>)、螺旋纤维藻 (<i>Ankistrodesmus spiralis</i>)、蹄形藻 (<i>Kirchneriella</i>)、四鞭藻 (<i>Carteria</i>)、四尾栅藻 (<i>Scenedesmus quadricauda</i>)、长绿梭藻 (<i>Chlorogonium elongatum</i>)、空球藻 (<i>Eudorina</i>)、嗜蚀隐藻 (<i>Cryptomonas erosa</i>)、卵形隐藻 (<i>Cryptomonas ovata</i>)、坎宁顿拟多甲藻 (<i>Peridiniopsis cunningtonii</i>)、角甲藻 (<i>Ceratium</i>)、二角多甲藻 (<i>Peridinium bipes</i> Stein)、裸甲藻 (<i>Gymnodinium aerucyinosum</i> Stein)、微小多甲藻 (<i>Peridinium pusillum</i>)、颗粒直链藻 (<i>Aulacoseira granulata</i>)、梅尼小环藻 (<i>Cyclotella meneghiniana</i>)、针杆藻 (<i>Synedra</i>)、小环藻 (<i>Cyclotella</i>)、平板藻 (<i>Tabellaria</i>)、舟形藻 (<i>Navicula</i>)、星杆藻 (<i>Asterionella</i>)、十字脆杆藻 (<i>Frailaria harrissonii</i>)、脆杆藻 (<i>Frailaria</i>)、桥弯藻 (<i>Cymbella</i>)、菱形藻 (<i>Nitzschia</i>)、卵形藻 (<i>Cocconeis</i>)、双菱藻 (<i>Surirella</i>)、南方囊裸藻 (<i>Trachelomonas</i>)、裸藻 (<i>Euglena</i>)、锥囊藻 (<i>Dinobryon</i>)、鱼鳞藻 (<i>Mallomonas</i>)、颤藻 (<i>Oscillatoria</i>)、微囊藻 (<i>Microcystis</i>)、拟柱孢藻 (<i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>)
洛东水电站 Luodong	针形纤维藻 (<i>Ankistrodesmus acicularis</i>)、小桩藻 (<i>Characium</i>)、小球藻 (<i>Chlorella vulgaris</i>)、镰形纤维藻 (<i>Oscillatoria limosa</i>)、衣藻 (<i>Chlamydomonas</i>)、三角四角藻 (<i>Tetraedron trigonum</i>)、单角盘星藻 (<i>Pediastrum simplex</i>)、隐藻 (<i>Cryptomonas</i>)、坎宁顿拟多甲藻 (<i>Peridiniopsis cunningtonii</i>)、多甲藻 (<i>Peridinium perardiforme</i>)、角甲藻 (<i>Ceratium</i>)、颗粒直链藻 (<i>Aulacoseira granulata</i>)、针杆藻 (<i>Synedra</i>)、桥弯藻 (<i>Cymbella</i>)、脆杆藻 (<i>Frailaria</i>)、舟形藻 (<i>Navicula</i>)、十字脆杆藻 (<i>Frailaria harrissonii</i>)、美丽星杆藻 (<i>Asterionella formosa</i> Hassall)、裸藻 (<i>Euglena</i>)、锥囊藻 (<i>Dinobryon</i>)、鱼鳞藻 (<i>Mallomonas</i>)
糯米滩水电站 Nuomitan	丝藻 (<i>Ulothrix</i>)、四鞭藻 (<i>Carteria</i>)、拟球藻 (<i>Nannochloropsis salina</i>)、嗜蚀隐藻 (<i>Cryptomonas erosa</i>)、隐藻 (<i>Cryptomonas</i>)、埃尔拟多甲藻 (<i>Peridiniopsis elpatiewskyi</i>)、坎宁顿拟多甲藻 (<i>Peridiniopsis cunningtonii</i>)、裸甲藻 (<i>Gymnodinium aerucyinosum</i> Stein)、舟形藻 (<i>Navicula</i>)、桥弯藻 (<i>Cymbella</i>)、针杆藻 (<i>Synedra</i>)、菱形藻 (<i>Nitzschia</i>)、双菱藻 (<i>Surirella</i>)、平板藻 (<i>Tabellaria</i>)、裸藻 (<i>Euglena</i>)、囊裸藻 (<i>Trachelomonas</i>)、鱼鳞藻 (<i>Mallomonas</i>)、颤藻 (<i>Oscillatoria</i>)

粒直链藻 (*Melosira granulata*)、隐藻门中的嗜蚀隐藻 (*Cryptomonas erosa*) 等。

从类群上来看,龙江河的优势种群为绿藻门和硅藻门。依据浮游植物优势类群对水质评价^[13]认为,硅藻门和绿藻门大量出现代表富营养水体,蓝藻门和绿藻门大量出现代表重富营养水体,隐藻门种类大量出现代表贫、中营养水体,甲藻门种类大量出现代表中营养水体,以此判断龙江河处于富营养水体。另外,各污染指示种如颗粒直链藻、针杆藻 (*Synedra* sp.)、四尾栅藻 (*Scenedesmus quadricauda*)、桥弯藻 (*Cymbella* sp.) 等在各监测点出现频率也较高,而这些藻类都属于 β-中污带指示种^[14],表明龙江河属于 β-中污类型水体。

2.1.2 浮游植物密度及优势种特征

由表 3 可以看出,共有 3 个采样点的浮游植物密度大于 5×10^6 cells · L⁻¹,依据表 1 的评价标准初步判断龙江河水体富营养化。此外,这 3 个点的拟多甲藻丰度水平很高,都达到 1×10^6 cells · L⁻¹ 以上,最高的为糯米滩水电站 5.13×10^6 cells · L⁻¹,甲藻含量百分比为 91.76%,说明该处还存在甲藻水华现象。

表 3 龙江河浮游植物密度及优势种密度

Table 3 The density of phytoplankton in Longjiang River and the density of dominant species

点位 Point	浮游植物 数量 Quantity of phytoplankton ($\times 10^4$ cells \cdot L $^{-1}$)	甲藻数量 Quantity of dinoflagellate ($\times 10^4$ cells \cdot L $^{-1}$)	甲藻 百分比 Percent- age of dinofla- gellate (%)	叶绿素 a Chl a (mg \cdot m $^{-3}$)
三江口 Sanjiangkou	594.52	190.82	32.10	27.88
拉浪水电站 Lalang	562.50	332.50	59.11	21.76
洛东水电站 Luodong	26.10	12.60	48.28	7.54
糯米滩水电站 Nuomitan	559.30	513.24	91.76	25.43

2.2 富营养化分析评价

2.2.1 生物多样性指数

由表 4 可见,三江口、拉浪水电站和洛东水电站的多样性指数(H')分别为 2.99, 2.61 和 2.58, 均匀度指数(J)分别为 0.44, 0.45 和 0.48, 依据表 1, 这 3 处的营养水平为中营养型, 水质受轻度污染。而糯米滩水电站的多样性指数(H')为 0.68, 小于 1; 均匀度指数(J)为 0.18, 小于 0.3, 依据表 1, 该采样点

表 5 各点位营养状态指数及营养状态

点位 Point	TLI(Chl a)	TLI(TP)	TLI(TN)	TLI(COD _{Mn})	TLI(SD)	TLI(Σ)	营养状态 Trophic status
三江口 Sanjiangkou	61.14	48.67	65.84	38.31	52.18	53.60	轻度富营养 Light eutropher
拉浪水电站 Lalang	58.45	42.09	67.96	39.66	43.31	50.64	轻度富营养 Light eutropher
洛东水电站 Luodong	46.94	48.67	58.58	21.58	33.40	42.10	中营养 Mesotrophic
糯米滩水电站 Nuomitan	60.14	45.71	69.22	36.89	43.31	51.51	轻度富营养 Light eutropher

依据营养状态指数 TLI(Σ)和生物多样性指数, 结合浮游植物密度(D)和 Chl a 浓度多方面综合评价龙江河水体营养状况得出: 龙江河春季水体处于中营养和轻度富营养水平。

3 讨论

3.1 龙江河甲藻水华现象

从浮游植物优势种的鉴定分析结果来看, 甲藻数量均值为 2.62×10^6 cells \cdot L $^{-1}$, 最高的糯米滩水电站达到 5.13×10^6 cells \cdot L $^{-1}$, 甲藻含量百分比为 91.76%, 已基本达到甲藻水华程度。拟多甲藻的色素体呈黄褐色, 高数量的拟多甲藻有可能使水体呈现褐色的, 龙江河段的 4 个采样点水色略呈黑褐色, 可见其水体中拟多甲藻达到一定数量。本次调查的 4 个点位 DO 均值分别为 14.93 mg \cdot L $^{-1}$ 、17.26

营养水平属于富营养型, 水质受重度污染。

表 4 各点位多样性指数和均匀度指数

Table 4 Shannon-Weaver index and Evenness index of phytoplankton at each site

点位 Point	H'	J	营养水平 Trophic level
三江口 Sanjiangkou	2.99	0.44	中营养型 Mesotrophic
拉浪水电站 Lalang	2.61	0.45	中营养型 Mesotrophic
洛东水电站 Luodong	2.58	0.48	中营养型 Mesotrophic
糯米滩水电站 Nuomitan	0.68	0.18	富营养型 Eutrophic

2.2.2 营养状态指数 TLI(Σ)

从表 5 中可以看出, 龙江河上三江口、拉浪水电站、糯米滩水电站的 TLI(Σ) > 50, 依据表 1 中营养状态指数与营养水平的关系可知, 这 3 个采样点处于富营养化状态, 为轻度富营养化。洛东水电站为中营养型, 主要因洛东水电站地形独特, 河中有孤山将河分叉开, 采样点位于水流速度较快的主河, 流速对浮游植物的生长有一定影响, 进而影响透明度等其它因素。

mg \cdot L $^{-1}$ 、12.56 mg \cdot L $^{-1}$ 和 13.00 mg \cdot L $^{-1}$, pH 值分别为 8.86, 9.22, 8.47 和 8.56, DO、pH 值水平偏高, 所得结果与边归国等^[15]的研究结果一致: 2009 年 1 月在福建九龙江北溪发生拟多甲藻水华, 当时水体的 pH 值、DO 都很高。水体 pH 值、DO 水平异常升高是拟多甲藻水华的特征现象, 王海珍等^[16]研究认为埃尔多甲藻水华的发生导致水体的 pH 值和 DO 水平上升。有人认为甲藻水华发生过程常伴有大量的硅藻, 因为大量存在的硅藻可能会消耗并减少一种或更多种的无机营养, 此时无机营养的浓度适合于甲藻的生长, 但限制硅藻的生长; 同时, 诸如对甲藻生长非常重要的 VB12 又可由硅藻产生, 使得甲藻成为优势种类^[17], 本次调查区域存在大量硅藻, 可能对甲藻水华存在一定促进作用。此外, 调查取样期间气温和水温的变化、低缓的水流速度也是导致龙江河段产生

拟多甲藻水华的关键因素^[18]。

3.2 龙江河浮游植物群落特征的影响因素

首先,龙江河的湖库化给龙江河浮游植物的大量生长提供空间条件。流动性很强的河流营养物质组成不稳定,水流的扰动作用大,不利于浮游生物的繁殖生长,而较缓的水流往往能给浮游植物提供稳定的生长空间;梯级电站的建设改变河流的水动力条件,使河流分成多段,电站上游被截为成湖库,湖库波动较小,其它条件合适的情况下,浮游藻类能够稳定增长。此次调查分析中4个监测点都是湖泊型湖库,甲藻水华和大藻爆发都说明水动力条件也是水体富营养化的诱因之一,研究结果与王崇等^[2]、苟婷等^[19]关于红水河、贺江等周边西江流域相关研究类似。

其次,河流接纳的农业源污染和城市生活废水中高含量氮磷为龙江河浮游植物的大量生长提供营养基础。此次调查的各点位测得的TN分别为 $1.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $2.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.38 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,TP分别为 $0.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,这与曾经发生过水华的香溪河、小江、九龙江、龙潭湖等水体较为接近,表明龙江河已具备藻类大量繁殖的营养基础^[6]。

再次,适宜的气象条件促进浮游植物大量繁殖。调查期间平均温度 25°C ,南风小于3级,多云晴天天气为主,非常适宜水生植物的大量繁殖,且出现特定优势种。温度是浮游藻类分布的重要影响因子^[20], 20°C 左右的水域可能出现大量的硅藻, 30°C 左右的水域可能出现大量的绿藻, 40°C 左右时蓝藻出现的几率较高,本研究调查的结果与这一结论基本吻合,硅藻和绿藻占比较高,种类也相对丰富。

鉴于以上讨论结果,建议在温度和风力等适宜藻类水华的春季夏季时期,适当通过开闸放水等增加水流速度的措施,防止大规模藻类爆发给龙江河流域水生态环境带来严重危害。另应控制龙江河流域氮磷污染的流入(主要控制农业面源和城市生活废水的排放),并适当控制龙江河及其支流网箱养殖规模,提倡科学投喂饲料等。

4 结论

1)采集浮游植物样品共镜检到7门42属56种(变种),其中绿藻门和硅藻门的种类最丰富,绿藻门占总数的37.5%,硅藻门占25.0%,蓝藻门10.7%,甲藻门10.7%,裸藻门占7.1%,隐藻门占5.3%,金藻门占3.6%。4个采样点浮游植物细胞密度为 $0.26 \times 10^6 \sim 5.94 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$,甲藻门中的拟多甲藻丰度水平最高,糯米滩水电站甲藻含量百分比为

91.76%,细胞密度为 $5.13 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$,说明该处还存在甲藻水华现象。

2)龙江河营养状态指数TLI(Σ)为42.10~53.60,属于中营养和轻度富营养状态。

影响龙江河浮游植物群落结构特征的主要环境因素是水动力条件、氮磷营养盐和气象条件,在气象条件不可控的情况下,为降低藻类水华风险,建议采取开闸放水以增加水流速度和控制氮磷输入等措施。

参考文献:

- [1] 雷欢,梁银铨,朱爱民,等.三峡水库童庄河浮游植物及其与水质的关系[J].湖泊科学,2010,22(2):195-200.
LEI H, LIANG Y Q, ZHU A M, et al. Phytoplankton and water quality in the Tongzhuang River of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Lake Science, 2010, 22(2):195-200.
- [2] 王崇,憨雪莹,常秀玲,等.红水河干流梯级水库秋季浮游植物群落结构特征与水质评价[J].水产学杂志,2015,28(5):42-47.
WANG C, HAN X Y, CHANG X L, et al. Community structure characteristics of phytoplankton and water quality assessment in cascade reservoirs in Hongshui River drainage in autumn[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2015, 28(5):42-47.
- [3] 阮嘉玲,范喜梅,雷航,等.相关加权综合营养状态指数方法在三峡水库富营养化评价中的应用[J].武汉工业学院学报,2013,32(2):33-36.
RUAN J L, FAN X M, LEI H, et al. Application of correlation weighted comprehensive nutritional index in the eutrophication assessment of the Three-Gorges Reservoir[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2013, 32(2):33-36.
- [4] 蔡庆华.湖泊富营养化综合评价方法[J].湖泊科学,1997,9(1):89-94.
CAI Q H. Eutrophication comprehensive evaluation of lakes[J]. Journal of Lake Science, 1997, 9(1):89-94.
- [5] 俞立中,许羽,蔡述明,等.GIS技术在洪湖环境演变研究中的应用[J].湖泊科学,1993,5(4):350-357.
YU L Z, XU Y, CAI S M, et al. A GIS based study on recent environmental change in Honghu Lake[J]. Journal of Lake Science, 1993, 5(4):350-357.
- [6] 赵学敏,马千里,姚玲爱,等.龙江河水体中氮磷水质风险评价[J].中国环境科学,2013,33(S1):233-238.
ZHAO X M, MA Q L, YAO L A, et al. Water quality risk assessment based on nitrogen and phosphorus in Longjiang River[J]. China Environmental Science, 2013, 33(S1):233-238.
- [7] SHANNON C E, WEAVER W. The Mathematical Theory of Communication[M]. Urbana: University of Illinois, 1949.

- nois Press, 1949.
- [8] TOKESHI M. The structure of diversity in an epiphytic chironomid community[J]. *Aquatic Ecology*, 1992, 26: 461-470.
- [9] 刘金殿, 顾志敏, 杨元杰, 等. 长诏水库浮游植物群落结构及水质评价[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(11): 2865-2871.
- LIU J D, GU Z M, YANG Y J, et al. Phytoplankton community structure and water quality assessment of Changzhao Reservoir, Zhejiang of East China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(11): 2865-2871.
- [10] PIELOU E C. *Ecological Diversity*[M]. New York: John Wiley, 1975.
- [11] SCHOLL K, SZOVENYI G. Planktonic rotifer assemblages of the Danube River at Budapest after the red sludge pollution in Hungary[J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2011, 87(2): 124-128.
- [12] 原居林, 尹文林, 沈锦玉, 等. 南太湖浮游植物特征及其富营养化评价[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(11): 2197-2201.
- YUAN J L, YIN W L, SHEN J Y, et al. Phytoplankton and its relations with eutrophication of southern Taihu Lake[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(11): 2197-2201.
- [13] 马成学, 于洪贤, 张新刚, 等. 牡丹江干流春季浮游植物双向指示种(TWINSPAN)分类及水质评价研究[J]. *淡水渔业*, 2008, 38(3): 58-62.
- MA C X, YU H X, ZHANG X G, et al. A study on TWINSPAN classification of phytoplankton and water quality evaluation in Mudanjiang in Spring[J]. *Fresh Water Fisheries*, 2008, 38(3): 58-62.
- [14] 李芳芳, 董芳, 段梦, 等. 大辽河水系夏季浮游植物群落结构特征及水质评价[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(11): 2489-2496.
- LI F F, TONG F, DUAN M, et al. Phytoplankton community structure and water quality of Daliaohe River system in summer[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(11): 2489-2496.
- [15] 边归国, 陈宁, 胡征宇, 等. 福建某河流甲藻水华与污染指标的关系[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(3): 405-410.
- BIAN G G, CHEN N, HU Z Y, et al. A river in Fujian algal dinoflagellate relationship with the pollution index[J]. *Journal of Lake Science*, 2010, 22(3): 405-410.
- [16] 王海珍, 刘永定, 沈银武, 等. 云南漫湾水库甲藻水华生态初步研究[J]. *水生生物学报*, 2004, 28(2): 213-125.
- WANG H Z, LIU Y D, SHEN Y W, et al. Preliminary research on water bloom of dinophyceae in Yunan Manwan hydropower station reservoir[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2004, 28(2): 213-125.
- [17] Robert F. *Phycology*[M]. 2nd ed. London: Cambridge University Press, 1989: 359.
- [18] 边归国, 刘国祥, 陈克华, 等. 福建龙岩市龙潭湖甲藻水华成因的研究[J]. *中国环境科学*, 2012, 30(12): 1678-1682.
- BIAN G G, LIU G X, CHEN K H, et al. The possible cause of a dinoflagellate bloom occurring in Longtan Lake[J]. *China Environmental Science*, 2012, 30(12): 1678-1682.
- [19] 苟婷, 许振成, 李杰, 等. 珠江流域西江支流贺江浮游藻类群落特征及水质分析[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(3): 412-420.
- GOU T, XU Z C, LI J, et al. Phytoplankton community structure and water quality assessment of Hejiang River, a branch of Xijiang River, Pearl River drainage basin[J]. *Journal of Lake Science*, 2015, 27(3): 412-420.
- [20] WANG Z H, CUI F Y, AN Q. Influence of water temperature and trophic value on algae blooming in reservoirs[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(1): 10-15.

(责任编辑:米慧芝)