

丹江口水库浮游植物时空动态及影响因素

申恒伦^{1,2}, 徐耀阳¹, 王岚^{1,2}, 张敏^{1,2}, 孔令惠¹, 蔡庆华^{1*}

(1. 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 2007年7月至2008年6月对丹江口水库浮游植物进行了为期一年的调查和分析,共采集到浮游植物8门、60属、110种及变种。种类组成以绿藻门、硅藻门和蓝藻门为主,其中绿藻门占优势,共计46种(42%),其次为硅藻35种(32%)。藻类年平均密度为 4.17×10^6 cell/L,最高密度为 6.10×10^7 cell/L,最低密度为 5.16×10^3 cell/L。各季节浮游植物优势种差异显著,春季为一种颤藻(*Oscillatoria* sp.)和尖针杆藻(*Synedra acus*),夏秋两季为嗜蚀隐藻(*Cryptomonas erosa*),冬季转为倪氏拟多甲藻(*Peridiniopsis niei*)。空间分布上,丹江、汉江库区以及取水口3个区域浮游植物优势种为尖针杆藻,五青入库区则以倪氏拟多甲藻占优势。磷浓度是驱动丹江口水库藻类密度的主要影响因子。根据建库几十年来的对丹江口水库较为全面的4次调查资料,分析了丹江口水库的浮游植物群落演替及变化趋势。自1958年以来,50年间,整个水库浮游植物密度增加了16倍,水库富营养化程度有增加的趋势。种类组成由适应河流的固着型硅藻,经过硅藻-绿藻-蓝藻型逐渐发展为硅藻-甲藻-隐藻-蓝藻型。

关键词: 丹江口水库; 浮游植物; 群落结构; 藻类密度; 演替趋势

中图分类号: Q949.2; Q948

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2011)06-0683-08

Spatial and Temporal Variations of Phytoplankton in Danjiangkou Reservoir and its Affecting Factors

SHEN Heng-Lun^{1,2}, XU Yao-Yang¹, WANG Lan^{1,2}, ZHANG Min^{1,2},
KONG Ling-Hui¹, CAI Qing-Hua^{1*}

(1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: According to the investigation and analysis of phytoplankton in Danjiangkou Reservoir from July 2007 to June 2008, eight phyla including 60 genera and 110 phytoplankton species and varieties were found. Phytoplankton composition was dominated by Cyanophyta (46 species), Chlorophyta (35 species) and Bacillariophyta, with the two former accounting for 42% and 32% of total taxa, respectively. Algae density averaged 4.17×10^6 cell/L, and ranged from 5.16×10^3 to 6.10×10^7 cell/L. Seasonally, phytoplankton showed significant differences in dominant taxa, with *Oscillatoria* sp. and *Synedra acus* dominating in spring, *Cryptomonas erosa* during summer and autumn, and *Peridiniopsis niei* during winter. Spatially, *Synedra acus* was the dominant taxa in the Danjiang, Hanjiang and Qushuikou regions, while *Peridiniopsis niei* dominated in Wuqing. Phosphorus concentration was the main factor controlling algae density in the Danjiangkou Reservoir. Combined with published Danjiangkou Reservoir data, the phytoplanktonic community trend in the reservoir was also analyzed during several decades after damming. Since 1958, the density of phytoplankton in the reservoir has increased by 16 times, and eutrophication of the reservoir has become increasingly serious. Phytoplankton composition changed from Bacillariophyta to Bacillariophyta-Cyanophyta-Chlorophyta type, and then was gradually replaced by Bacillariophyta-Pyrrophyta-Cryptophyta-Cyanophyta.

收稿日期: 2011-03-21, 修回日期: 2011-05-24。

基金项目: 国家“十一五”科技支撑课题(2006BAC10B02); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201101001)。

作者简介: 申恒伦(1983-), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事淡水生态学、流域生态学研究(E-mail: shenhenglun@gmail.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: qhcai@ihb.ac.cn)。

Key words: Danjiangkou Reservoir; Phytoplankton; Community structure; Algae density; Succession tendency

水库是一种介于河流与湖泊间的通过人工筑坝的方式形成的半自然水体。随着社会经济的持续高速发展及对生态环境破坏的加剧,各地供水水质明显退化,水库的功能由早期的防洪、发电、灌溉、航运等向供水转变已成为世界性趋势^[1]。我国是水资源短缺的大国,如北方资源性缺水严重、南方湖泊生态系统退化(滇池、太湖等水体的富营养化)等问题^[2-4]尤为突出,也会在一定程度上加剧对水库供水的需求。

浮游植物作为水域生态系统最主要的初级生产者,在整个生态系统的物质循环、能量流动以及信息传递中起着极其重要的作用^[5]。浮游植物的群落组成、数量分布及季节动态是其群落结构的重要特征。浮游植物群落结构、功能与水质有着极为密切的关系。对水库生态系统演替与水环境的监测研究,将会为我国水库水质管理与生态系统保护提供基础资料,并在丰富水库生态学和经典湖沼学方面做出贡献。由于世界各国的水库建设的时间都相对较短,对水库生态系统的研究与数据积累较少。水库作为一种具有河流与湖泊的杂合型的特殊的新型生态系统类型,关于水库营养盐的来源与循环、水动力、功能分区以及生态系统方面的各项研究已得到关注。而对水库生态系统的研究已经成为国内外科学家比较关注的问题之一^[6-10],水库生态学有理由成为湖沼学理论创新的重要研究领域^[11]。

丹江口水库位于豫、鄂、陕交界的湖北省丹江口市和河南省淅川县境内,是一座综合性的大型水利枢纽工程,也是南水北调中线工程的水源地。该水库纳汉江与丹江之水,呈“V”字型,汉江库区较为狭长,丹江库区较为开阔。南水北调中线工程的“渠首”位于丹江库区的陶岔^[1,2]。该工程全面竣工后,将“渠首”与京津大地相贯通,以 500 m³/s 的流量把丹江口水库的水送往华中、华北地区,重点解决北京、天津、石家庄市等沿线 20 多座大中城市的缺水问题,并兼顾沿线生态环境与农业用水。丹江口水库于 1958 年开始建设,1973 年竣工,控制流域面积达 95200 km²,正常蓄水位 157 m,水域面积

750 km²,总库容 174.5 × 10⁸ m³,曾被誉为亚洲第一大人工水库^{[2][12]}。大坝加高到 176.6 m 高程,南水北调中线工程将于 2014 年汛后调水,届时蓄水位提高到 170 m,总库容达 290.5 亿 m³,年调水量可达 130 亿 m³^[12,13]。自丹江口水库竣工以来,水库在防洪、发电、灌溉、航运、养殖、旅游等方面产生了巨大的综合效益。近年来,随着人口的持续增加、经济的快速发展,丹江口库区部分支流的生态环境日益恶化,人为污染日趋加剧^[14-16],水质的安全管理和水生态系统的健康维护关系到南水北调中线一期工程综合效益的正常发挥,甚至影响到当地及沿线社会经济的可持续发展。

丹江口水库自建设伊始就倍受相关学者的广泛关注。其研究工作主要集中在水土保持^[17]、水质状况^[15]、水化学组成^[18]等方面,有关丹江口水库的浮游植物^[19-23]、底栖动物^[24]、浮游轮虫^[25]等相关的水生生物资源的研究也已相继开展。有关丹江口水库浮游植物的研究可以追溯到水库兴建前,波鲁茨基等^[19]曾于 1958 年对丹江口库区进行了一次大范围的水生生物调查。建库后,杨广等^[20]和郭红娟等^[21]也分别于 1986-1987 年和 1992-1993 年进行过更深入的调查。2003-2006 年期间,南阳师范学院联合南阳市环境监测站曾对南水北调中线水源地的丹江库区做过详细的调查与研究分析^[23,26-30]。为此,本研究于 2007 年 7 月-2008 年 6 月,对整个丹江口水库浮游植物和理化环境进行了更详尽的调查,旨在了解丹江口水库的浮游植物群落结构的时空变化及演替过程,为南水北调中线工程水源地的水质安全和水生态系统健康维护提供相应的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域与样点设置

依据丹江口水库的地形特点及建坝位置,将整个水库划分为丹江库区和汉江库区 2 个区域设置采样点(图 1)。丹江库区设置 5 个采样点(D01、D02、D03、D04 和 TC);汉江库区设置 9 个采样点

1) 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院。南水北调中线一期工程可行性研究总报告,2005。

2) 长江水利委员会。南水北调中线水源地水资源规划,2006。

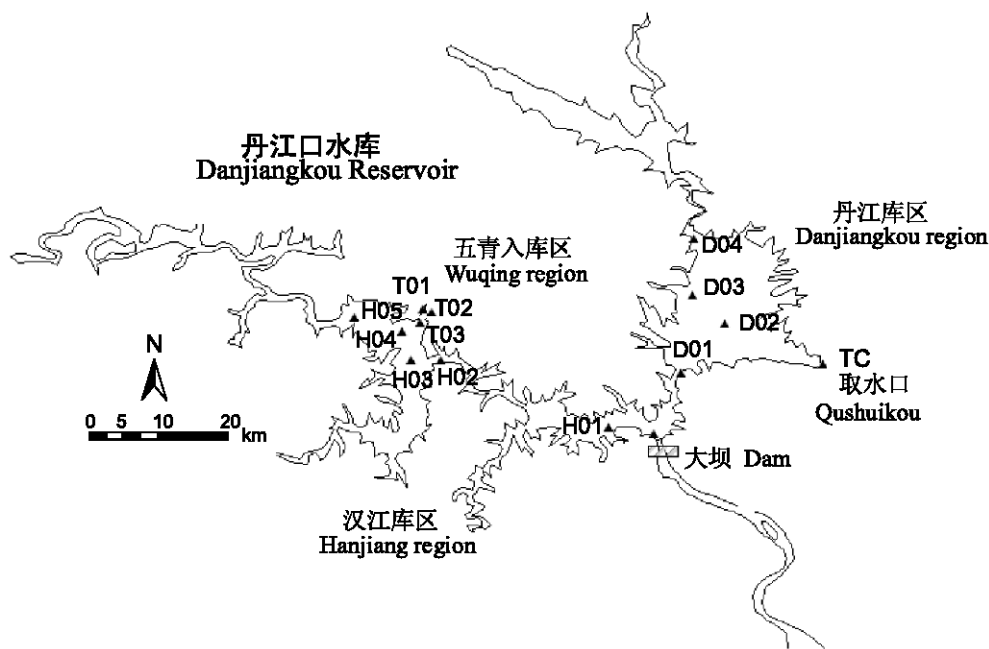


图1 丹江口水库样点分布
Fig. 1 Sampling sites in the Danjiangkou Reservoir

(T01、T02、T03、H01、H02、H03、H04、H05、Dam)。其中,TC为南水北调中线工程水源地取水口陶岔。由于水源地监测研究需要,本研究将TC样点单独列出,称为取水口。T01、T02分别为汉江库区的两条入库河流五龙池、青塘河与丹江口水库汇合处。由于入库支流水质影响的特殊性,将T01、T02样点划为一区,称五青入库区。

1.2 样品采集与测定

2007年7月-2008年6月自丹江库区到汉江库区沿各样点分别采水样和浮游植物样品:用柱状采水器采集5 L表层混和水样,取300 mL水样用浓硫酸将其酸化至pH值略小于2,带回室内测定其营养盐的浓度;取1220 mL水样现场用鲁哥氏固定液(Lugols solution)固定,静置沉淀48 h,采用虹吸的方法浓缩到30 mL左右后添加甲醛保存,用于后续浮游植物的鉴定及定量分析^[31]。

水体透明度用萨氏圆盘(Secchi disc)现场测定;采用YSI多参数水质测量仪(YSI 6600 EDS)现场测量水温(WT)、浊度(Turb)、溶解氧(DO)、pH等指标;总氮(TN)、硝态氮(NO₃-N)、铵态氮(NH₄-N)、总磷(TP)、正磷酸盐(PO₄-P)等水化学指标用流动分析仪(SAN⁺⁺, Skalar)测定;取均匀亚样品0.1 mL于浮游植物计数框中,在400×日本Olympus CX21光学显微镜下进行种类鉴定和计数,浮

游植物鉴定参照《中国淡水藻类——系统、分类及生态》^[32]。

1.3 数据分析方法

本文采用方差分析检验浮游植物密度的差异性,利用Pearson相关性分析探讨浮游植物密度与环境因子的关系,统计处理在SPSS 16.0软件上完成。

2 结果与分析

2.1 浮游植物群落基本特征

2007年7月-2008年6月,在丹江口水库共采集到浮游植物110种(含变种),隶属8门33科60属,各门浮游植物的种类数、密度及优势种见表1。种类组成以绿藻门、硅藻门和蓝藻门为主,其中绿藻门最多(46种),占总种数的41.82%,其次是硅藻门(31.82%)和蓝藻门(13.64%),三者共占87.28%。甲藻门在丰度上占绝对优势,约占总密度的40.92%,其次是硅藻门(22.46%)、隐藻门(16.73%)和蓝藻门(13.16%),四者共占93.27%。调查期间,整个水库浮游植物平均密度达 4.17×10^6 cell/L,最高密度为 6.10×10^7 cell/L,最低密度为 5.157×10^3 cell/L。

2.2 浮游植物群落与密度季节动态

浮游植物密度在春、夏、秋季较低,均小于 5.00×10^6 cell/L,冬季密度与前三季差异较大,

高达 7.17×10^6 cell/L;从群落组成上看,夏秋两季各门类浮游植物密度百分比相差不大,但与冬、春两季有较大差异(见图 2)。春季浮游植物群落主要以蓝藻-硅藻型(94.01%)为主,优势种为一种颤藻(*Oscillatoria* sp.)和尖针杆藻(*Synedra acus*);夏秋季演替为隐藻-蓝藻-绿藻型(78.08%~96.16%),隐藻中的嗜蚀隐藻(*Cryptomonas erosa*)成为优势种,到冬季逐渐发展为硅藻-隐藻-甲藻型群落结构,倪氏拟多甲藻(*Peridiniopsis niei*)转为绝对优势种,该种拟多甲藻也是三峡水库香溪河库湾的主要水华种^[33]。由于冬季五青入库区暴发拟多甲藻水华,密度高达 4.82×10^7 cell/L(密度百分比达 96.26%),影响了整个冬季的浮游植物群落组成的格局。冬季调查期间,整个丹江口水库的浮游植物群落组成中,拟多甲藻占五青入库区群落组成百分比的 99.06%,硅藻只占 0.35%。取水口主要由硅藻和蓝藻(87.63%)组成,硅藻和隐藻占据了丹江库区 94.20% 的比例,汉江库区主

要是硅藻(61.89%),其次是甲藻(15.14%)和隐藻(12.62%)(见图 3)。

2.3 丹江口水库浮游植物的空间分布

不同区域的密度和群落动态分布见图 4。浮游植物密度在丹江库区(8.86×10^5 cell/L)和汉江库区(1.49×10^6 cell/L)稍低于陶岔取水口(2.10×10^6 cell/L),污染最严重的五青入库区的浮游植物密度高达 2.10×10^7 cell/L;丹江库区、取水口、汉江库区与五青入库区浮游植物密度百分比差异显著($p < 0.05$),且硅藻门、蓝藻门种类由汉江库区到丹江库区逐渐减少,而甲藻门和隐藻门在汉江库区逐渐增加,五青入库区以倪氏拟多甲藻和嗜蚀隐藻占优势,其他区域以尖针杆藻为优势种。

2.4 浮游植物密度与环境因子的关系

浮游植物密度与环境因子之间具有密切的相关性,其在一定程度上反映了水体环境的变化状况^[34],为水库水环境的保护提供了有效合理的管理信息。Pearson 相关分析表明(表 2),浮游植物密

表 1 丹江口水库浮游植物种数、密度及优势种
Table 1 Species number, density and dominant species of phytoplankton in Danjiangkou Reservoir

门类 Phylum	分类单元数 Taxa	种数比例(%) Percentage	密度范围 Range of density ($\times 10^4$ cell/L)	年平均密度 Annual average density ($\times 10^4$ cell/L)	优势种 Dominant species
蓝藻门 Cyanophyta	15	13.64	0.52~469.00	44.65	颤藻 <i>Oscillatoria</i> sp.
金藻门 Chrysophyta	2	1.82	1.03~72.20	10.85	
黄藻门 Xanthophyta	1	0.91	0~7.22	4.44	
硅藻门 Bacillariophyta	35	31.82	0.52~740.00	9.323	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>
隐藻门 Cryptophyta	3	2.73	0.57~1400.00	34.67	嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i>
甲藻门 Pyrrophyta	5	4.55	0.52~6100.00	304.19	倪氏拟多甲藻 <i>Peridiniopsis niei</i>
裸藻门 Euglenophyta	3	2.73	1.03~11.40	3.90	
绿藻门 Chlorophyta	46	41.82	0.52~247.00	6.48	
总计 Total	110	100%	4.70~9046.62	417.49	

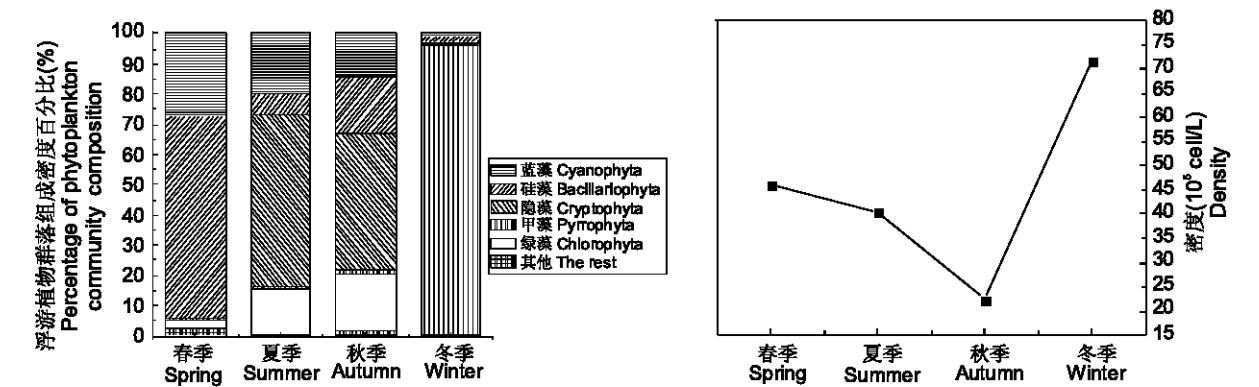


图 2 丹江口水库浮游植物群落组成和密度季节动态
Fig. 2 Seasonal dynamics of phytoplankton community composition and abundance in Danjiangkou Reservoir

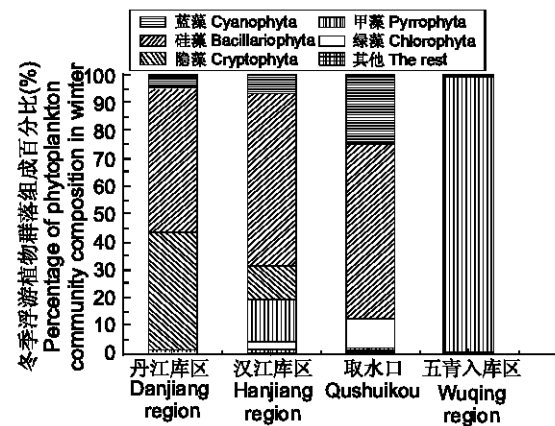
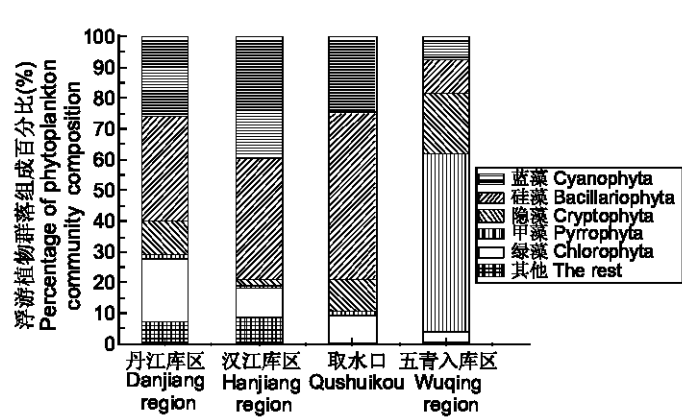


图 3 丹江口水库冬季浮游植物群落组成的空间分布
Fig.3 Spatial distribution of phytoplankton community composition of Danjiangkou Reservoir in winter

度与溶解氧 ($r = 0.586, p < 0.01$)、总磷 ($r = 0.727, p < 0.01$)、正磷酸盐 ($r = 0.568, p < 0.01$) 极显著正相关,与浊度 ($r = 0.332, p < 0.05$)、pH ($r = 0.379, p < 0.05$)、铵盐 ($r = 0.336, p < 0.05$) 显著正相关;而与水温、总氮、水体透明度等不存在显著相关关系。说明磷酸盐、总磷是影响丹江口水库藻类密度的主要因子,浊度与 pH、铵盐与浮游植物密度也有一定的相关性。



3 讨论

从建库前至今,丹江口水库浮游植物群落结构发生了极大变化(见表 3)。建库前,丹江口水库由于支流众多,水体流速较快,库区藻类主要以适应水流较急的固着型硅藻为主,甲藻门、绿藻门次之,种类在季节上变化不大。浮游植物密度最大为 4.46×10^6 cell/L,硅藻在密度百分比中占绝对优势,为 81.0%~92.3%,甲藻(0.9%~15.6%)、绿藻(4%~5%)次之;库区静水区主要种类是甲藻、绿藻,其次为硅藻和蓝藻。菱形藻属(*Nitzschia*)、蓝隐藻属(*Chroomonas*)、隐藻属(*Cryptomonas*)、衣藻属(*Chlamydomonas*)比较常见^[19]。总体而言,水库浮游植物表现为河流型特征。

1986-1987 年对丹江口水库的系统调查结果显示^[20]:丹江口水库浮游植物共监测到 8 门 92 属,以蓝藻、绿藻、硅藻门种类最多,月均密度为 1.08×10^6 cell/L,常见种为鲜亮席藻(*Phormidium lucidum*)、颤藻属(*Oscillatoria*)、微囊藻属(*Microcystis*)、水绵属(*Spirogyra*)、盘星藻属(*Pediastrum*)、直链藻属(*Melosira*)、脆杆藻属(*Fragilaria*)、黄丝

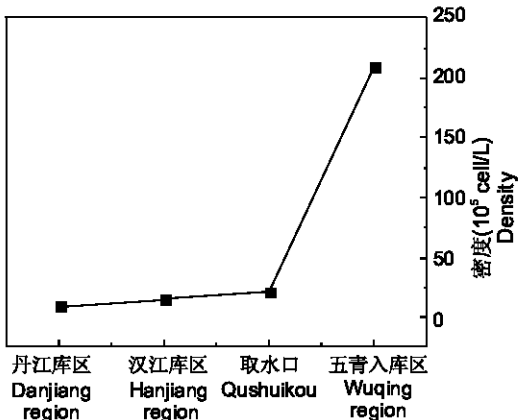


图 4 丹江口水库浮游植物群落组成和密度空间动态

Fig.4 Spatial dynamics of phytoplankton community composition and abundance in Danjiangkou Reservoir

表 2 丹江口水库浮游植物丰度与各环境因子间的相关关系(双尾检验)
Table 2 Associative relationship between phytoplankton abundance and environmental factors in Danjiangkou Reservoir (two-tailed test)

理化因子 Physical and chemical factors	溶解氧 DO	浊度 Turb	pH	水温(℃) Water temperature	总磷 TP	铵态氮 NH ₄ -N	正磷酸盐 PO ₄ -P
r 值	0.586 **	0.332 *	0.379 *	-0.168	0.727 **	0.336 *	0.568 **
p 值	< 0.01	0.034	0.015	0.294	<0.01	0.032	<0.01

* 表示显著相关, $p < 0.05$; ** 表示极显著相关, $p < 0.01$ 。
* Significant level at $p < 0.05$; ** Significant level at $p < 0.01$.

表 3 丹江口水库浮游植物群落结构年际变化
Table 3 Changes in the phytoplankton community structure of Danjiangkou Reservoir

采样年份 Sample year	调查区域 Investigation area	平均密度 (cell/L) Average density	种类组成 Species composition	优势种 Dominant species	水平分布 Horizontal direction
1958 (建库前) (Before reservoir established)	整个库区 The entire reservoir	$7.22 \times 10^4 \sim 4.46 \times 10^5$	硅藻 (81.00% ~92.30%)	菱形藻属 <i>Nitzschia</i>	汉江库区多为硅藻, 丹江库区多为甲藻、 绿藻 ^[19]
1986 -1987	整个库区 The entire reservoir	$5.04 \times 10^5 \sim 2.44 \times 10^6$	硅藻 (21.70% ~60.00%) 绿藻 (22.60% ~36.50%) 蓝藻 (21.70% ~60.00%)	鲜亮席藻 <i>Phormidium lucidum</i> 盘星藻属 <i>Pediastrum</i> 直链藻属 <i>Melosira</i>	种类大体相似,汉江 库区浮游植物密度 高于丹江库区 ^[20]
1992 -1993	整个库区 The entire reservoir	4.22×10^5	硅藻 (62.50% ~85.00%) 绿藻 (2.70% ~10.50%) 蓝藻 (21.70% ~60.00%) 甲藻 (2.20% ~8.90%)	鲜亮席藻 <i>Phormidium lucidum</i> 束丝藻属 <i>Aphanizonmenon</i> 小环藻属 <i>Cyclotella</i> 脆杆藻属 <i>Fragilaria</i>	两库浮游植物种类 和现存量显著不同 ^[21]
2003 -2006	丹江库区 Danjiang reservoir	$3.42 \times 10^5 \sim 1.27 \times 10^6$	硅藻 (39.00% ~63.92%) 绿藻 (22.15% ~28.00%) 蓝藻 (8.72% ~20.00%)	盘星藻属 <i>Pediastrum</i> 舟形藻属 <i>Navicula</i> 直链藻属 <i>Melosira</i> 角甲藻属 <i>Ceratium</i>	丹江库区硅藻为优 势类群 ^[23,26,28]
2007 -2008	整个库区 The entire reservoir	$8.86 \times 10^5 \sim 2.10 \times 10^7$	甲藻 (40.92%) 硅藻 (22.46%) 隐藻 (16.73%) 蓝藻 (13.16%)	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i> 啮蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i> 颤藻 <i>Oscillatoria</i> sp. 倪氏拟多甲藻 <i>Peridiniopsis niei</i>	两库相差不大,汉江 库区个别支流入口 出现拟多甲藻水华

藻属 (*Tribonema*)、角甲藻属 (*Ceratium*) 等,优势类群为鲜亮席藻、盘星藻属、直链藻属等。丹江库区、汉江库区两库区浮游植物种类大体相似。夏季种类最多,汉江库区以硅藻门的脆杆藻属占优,丹江库区以蓝藻门种类占相当比例,春、秋、冬三季汉江库区中下游都以鲜亮席藻占优势,整个库区的浮游植物种类已呈现湖泊型特征。

郭红娟等^[21]结合丹江口水库渔业规划和南水北调中线规划在 1992 -1993 年展开了深入调查,共采集到浮游植物 7 门 60 属,年均密度 4.22×10^5 cell/L,常年出现的种为直链藻属、针杆藻属 (*Synedra*)、脆杆藻属、小环藻属 (*Cyclotella*)、舟形藻属 (*Navicula*)、盘星藻属、角甲藻属、水绵属等,优势种为束丝藻属 (*Aphanizonmenon*)、席藻属 (*Phormidium*)、小环藻属和脆杆藻属群体,其中硅藻类(小环藻、脆杆藻)密度和生物量更占优势。两库浮游植物种类分布及现存量差异显著,汉江库区浮游植物种类(37 属)明显大于丹江库区(26 属),由汉江库区到丹江库区,硅藻门种类数渐少,蓝绿藻门渐增;汉江库区藻类年均密度为 5.46×10^5 cell/L,而

丹江库区为 2.55×10^5 cell/L。季节上浮游植物密度为:秋季>夏季>冬季>春季,冬春季硅藻门几近 100%,整个库区浮游植物种类由呈现湖泊型特征的硅藻-甲藻-蓝藻组成。

李运贤、张乃群等^[23,26,28]对南水北调中线水源区监测站的跟踪监测发现,硅藻门种类最多,其次是绿藻门和蓝藻门,水源区以盘星藻属、直链藻属、角甲藻属和颤藻属等为常见种,各监测站点的优势类群不完全一致,浮游植物密度有明显的季节变化,整个水源区年均藻类密度为 1.09×10^6 cell/L。

近年来,丹江口水库浮游植物种类组成随着时间变迁而不断改变,种类组成仍呈现湖泊型,以绿藻门、硅藻门和蓝藻门为主,但其中绿藻门占优势;甲藻门在数量上占绝对优势,约占总密度的 40.92%,其次是硅藻门(22.46%)、隐藻门(16.73%)和蓝藻门(13.16%),四者共占 93.27%。春季以硅藻门、蓝藻门为主,夏秋季主要是隐藻门,冬季以甲藻门的倪氏拟多甲藻为优势种。浮游植物密度为:冬季>春季>夏季>秋季。

通过对比,1958 年以来的 50 年间,整个水库浮

游植物密度增加了 16 倍之多,库区浮游植物年均密度大体呈现逐渐升高的趋势,这可能预示着丹江口水库的水质有进一步变坏的趋势。种类组成由适应河流的固着型硅藻,经过硅藻-绿藻-蓝藻型逐渐发展为硅藻-甲藻-隐藻-蓝藻型。空间分布上,藻类密度仍表现为汉江库区相对高于丹江库区,这可能因为汉江库区支流众多,仍属于河流型水体,使得水域生境多样性较高,从而造成了浮游植物的多样性增加。由于流速减缓,库区水体透明度和水温增加,库区富营养化程度加剧,绿藻、蓝藻大量出现,甲藻也在数量上增加。这基本符合建库前相关专家对库区浮游植物的预测^[19]。后 3 次调查结果显示,库区浮游植物密度季节变化的峰值时间发生了极大的改变,1987 年的峰值出现在夏季(7 月),1993 年的峰值在秋季(9 月)出现^[21],而本次调查出现峰值却时值冬季(2008 年的 1 月),这可能因为五青入库区的拟多甲藻水华而导致了浮游植物密度峰值出现在冬季。这能否说明丹江口水库的浮游植物群落演替的一个规律?几年后的峰值也许会出现春季。

此次调查还发现,磷浓度是影响丹江口水库浮游植物密度的主要因子,浊度与 pH、铵盐也对浮游植物的密度有不同程度的影响。正磷酸盐浓度已由建库前 1958 年的 0.013 mg/L 增加至 0.03 mg/L,增幅高达 1.3 倍。冬季拟多甲藻水华发生时,五青入库区 T01、T02 两样点的总磷浓度均高达 0.564 mg/L,磷酸盐浓度达 0.241 mg/L,其浓度远远高于邻近的 T03 样点,其总磷与磷酸盐浓度分别为 0.039 mg/L 和 0.030 mg/L。)与丹江口水库相比,三峡水库香溪河库湾发生拟多甲藻水华时,总磷含量达 0.568 mg/L^[33],三峡库区高岚河发生拟多甲藻水华时的总磷高达 0.854 mg/L^[35];而水温与其他理化指标之间相差不大。五青入库区过高的磷浓度,可能是丹江口水库局部出现水华的最主要原因,而水华的暴发也为丹江口水库的水质的保护敲响了警钟,因此应加强丹江口流域的水质管理与生态环境保护,尤其是水土流失较为严重的入库支流流域,以推进南水北调中线工程的顺利进行。

参考文献:

- [1] Straskraba M, Tundisi J G, Duncan A. State of the art of reservoir limnology and water quality management[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 1993: 213-288.
- [2] 王金霞, 黄季焜, 张丽娟, Scott Rozelle. 北方地区农民对水资源短缺的反应[J]. 水利经济, 2008, 26(5): 1-5.
- [3] 毛战坡, 彭文启, 王世岩, 周怀东. 滇池水体富营养化及控制措施评价[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(2): 135-142.
- [4] 朱广伟. 太湖富营养化现状及原因分析[J]. 湖泊科学, 2008, 20(1): 21-26.
- [5] 孙军, 刘东艳. 多样性指数在海洋浮游植物研究中的应用[J]. 海洋学报, 2004, 26(1): 62-75.
- [6] 蔡庆华, 唐涛, 刘建康. 河流生态学研究中的几个热点问题[J]. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1573-1577.
- [7] Manuwadi H, Penjai S, Wilaiwan U. Possible impact of dam reservoirs and river diversions on material fluxes to the Gulf of Thailand [J]. *Mar Chem*, 2002, 79: 185-191.
- [8] Han B P, Armengol J, Garcia J C. The thermal structure of Sau Reservoir (Spain NE): A simulation approach [J]. *Ecol Model*, 2000, 125: 109-122.
- [9] Campos V, Cantarero S, Urrutia H. Microcystin in cyanobacterial blooms in a Chilean lake [J]. *Syst Appl Microbiol*, 1999, 22: 169-173.
- [10] 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.
- [11] 韩博平. 中国水库生态学研究的回顾与展望[J]. 湖泊科学, 2010, 22(2): 151-160.
- [12] 国务院南水北调工程建设委员会. 南水北调中线丹江口大坝加高工程加高到顶[DB/OL]. <http://www.nsb.gov.cn/zx/tpbd/20100401/201004010017.htm>, 2010-04-01.
- [13] 傅新平. 我国水资源状况与南水北调工程[J]. 河南水利与南水北调, 2008(1): 1-2.
- [14] 赵文耀, 胡家庆. 丹江口水库流域面源污染现状分析[J]. 南水北调与水利科技, 2007, 5(4): 50-52.
- [15] 成庆利, 张杰. 丹江口水库水质现状分析与评价[J]. 环境与可持续发展, 2007(1): 12-13.
- [16] 王佳宁, 晏维金, 贾晓栋. 长江流域点源氮磷营养盐的排放、模型及预测[J]. 环境科学学报, 2006, 26(4): 658-666.
- [17] 邓丽, 贾鹏生, 路金钺, 潘自恒. 南阳市丹江口库区及上游水土保持生态健康剖析[J]. 水土保持研究, 2005, 12(4): 164-166.
- [18] 李思悦, 谭香, 徐志方, 张全发. 湖北丹江口水库主要

- 离子化学季节变化及离子来源分析[J]. 环境科学, 2008, 29(12): 3353–3358.
- [19] 波鲁茨基 E B, 伍献文, 白国栋, 戈敏生, 王乾麟, 王士达, 陈受忠. 丹江口水库库区水生生物调查和渔业利用意见[J]. 水生生物学集刊, 1959(1): 33–56.
- [20] 杨广, 杨干荣, 刘金兰. 丹江口水库浮游生物资源调查[J]. 湖北农学院学报, 1996, 16(1): 38–42.
- [21] 邬红娟, 彭建华, 韩德举. 丹江口水库浮游植物及其演变[J]. 湖泊科学, 1996, 8(1): 43–50.
- [22] 韩德举, 彭建华, 简东, 邹清, 邬红娟. 丹江口水库的饵料生物资源及水体营养状态评价[J]. 湖泊科学, 1997, 9(1): 62–67.
- [23] 李运贤, 张乃群, 李玉英, 杜敏华, 庞发虎, 胡兰群, 施建伟. 南水北调中线水源区浮游植物[J]. 湖泊科学, 2005, 17(3): 219–225.
- [24] 张敏, 邵美玲, 蔡庆华, 徐耀阳, 王岚, 孔令惠. 丹江口水库底栖动物群落结构及其水质生物学评价[J]. 湖泊科学, 2010, 22(2): 281–290.
- [25] 孔令惠, 蔡庆华, 徐耀阳, 王岚, 张敏. 丹江口水库浮游轮虫季节变动特征及水体健康评价[J]. 湖泊科学, 2010, 22(6): 941–949.
- [26] 张乃群, 余晓丽, 胡兰群. 南水北调中线水源区浮游植物时空分布及其营养状态[J]. 生态学杂志, 2008, 27(1): 14–22.
- [27] 李玉英, 高宛莉, 李家峰, 王庆林, 梁子安, 胡兰群, 程序. 南水北调中线水源区富营养化研究[J]. 中国农业大学学报, 2007, 12(5): 41–47.
- [28] 张乃群, 杜敏华, 庞振凌, 李玉英, 胡兰群. 南水北调中线水源区浮游植物与水质评价[J]. 植物生态学报, 2006, 30(4): 650–654.
- [29] 李玉英. 南水北调中线工程水源区微生物菌群研究[J]. 水利渔业, 2006, 26(4): 57–59.
- [30] 张乃群, 李运贤, 李玉英, 杜敏华, 胡兰群. 南水北调中线水源区水质生态监测(2005)[J]. 湖泊科学, 2006, 1(5): 535–539.
- [31] 蔡庆华. 水域生态系统观测规范——中国生态系统研究网络(CERN)长期观测规范丛书[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007: 29–110.
- [32] 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.
- [33] 徐耀阳, 蔡庆华, 黎道丰, 王岚, 孔令惠, 余伟. 三峡水库香溪河库湾拟多甲藻昼夜垂直分布初步研究[J]. 武汉植物学研究, 2008, 26(6): 608–612.
- [34] Thornton K W, Kimmel B L, Payne F E. Reservoir Limnology Ecological Perspectives[M]. New York: Wiley Interscience Publication, 1990: 1–246.
- [35] 汤宏波, 刘国祥, 胡征宇. 三峡库区高岚河甲藻水华的初步研究[J]. 水生生物学报, 2006, 30(1): 47–51.

(责任编辑: 王豫鄂)