

# 天鹅洲长江段浮游植物群落季节演替 及环境因子研究\*

胡俊<sup>1</sup> 龚成<sup>2</sup> 夏纬<sup>3</sup> 池仕运<sup>1</sup> 陈明秀<sup>1</sup> 李嗣新<sup>1</sup>

(1. 水利部中国科学院水工程生态研究所 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室 武汉 430079;  
2. 湖北长江天鹅洲白鱓豚国家级自然保护区管理处 石首 434400; 3. 长江航道局 武汉 430060)

**摘要** 通过研究长江天鹅洲白鱓豚国家级自然保护区长江段浮游动植物群落组成及其与环境因子之间的关系,揭示长江干流浮游植物群落的结构特征,以为该区域生态系统保护与研究提供基础资料和科学依据。2014—2015 年按季节分四次在干流沿途设置的 10 个采样点开展了浮游植物调查,并同步开展水温、溶解氧、总磷等水质因子监测,并采用典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)研究了不同季节浮游植物群落结构变化及其与环境因子的关系。结果表明:浮游植物种类以硅藻、绿藻和蓝藻为主;全年来看生物量组成主要是硅藻和隐藻,不过春秋时蓝绿藻密度组成占优。CCA 分析则进一步显示浮游植物群落组成四季变化明显,其中磷酸盐、溶解氧和氧化还原电位等水质因子对春季浮游植物群落结构存在显著的影响,但是夏冬季的浮游植物群落变化则可能是水文情势等条件起到了重要作用。

**关键词** 长江;浮游植物;群落结构;环境因子;典范对应分析

**中图分类号** Q145 **doi:** 10.11693/hyh20170400093

长江是中国第一大河,也是世界上保存比较完整的大流域性生态系统。在河流水生生物中,浮游植物由于其个体小、细胞结构简单等特点,对水质环境的变化极为敏感,其种类组成和分布对环境变化具有指示作用,而环境条件的变化也能直接或间接地影响浮游植物的群落结构(Lepistö *et al.*, 2004; Rodrigues *et al.*, 2015)。因此,研究长江干流的浮游植物具有重要意义。

近年来,有关长江浮游植物分布特征的研究受到了越来越多的生态学家关注。不过有关长江浮游植物群落的研究多集中于长江三峡和河口地区(张远等, 2006; 栾青杉等, 2007; 王越等, 2011; 王江涛, 2012; 李俊龙等, 2013; 张磊等, 2015),对长江干流荆江段的研究较少。荆江河段位于长江中游,属于典型的蜿蜒型冲积平原河流,河床演变剧烈,河流景观类型多样,尤其是下荆江属蜿蜒型河段,自由河曲极为发

育,生态意义突出(王越等, 2011; 薛兴华等, 2012)。

本研究选择湖北石首附近急弯形长江河段(89km)为研究对象,采用多元统计的方法,研究该河段浮游动植物群落结构季节变化,并采用多元统计方法探讨环境因子在浮游植物群落季节演替中的作用。此外,该河段也属于长江天鹅洲白鱓豚国家级自然保护区长江段,该区域生态环境的好坏直接关系到生活其中的保护动物如白鱓豚和江豚等栖息环境,为此本研究也为该区域生态系统保护与研究提供基础资料和科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查断面

项目组对调查河段进行了四次采样(图 1),分别为 2014 年 10 月(秋季)、2015 年 1 月(冬季)、2015 年 5 月(春季)和 2015 年 7 月(夏季)。

\* 国家自然科学基金项目,51409178 号;水利部公益性行业科研专项,201201113 号。胡俊,副研究员, E-mail: jhu@ihe.ac.cn  
收稿日期: 2017-04-12, 收修改稿日期: 2017-06-02

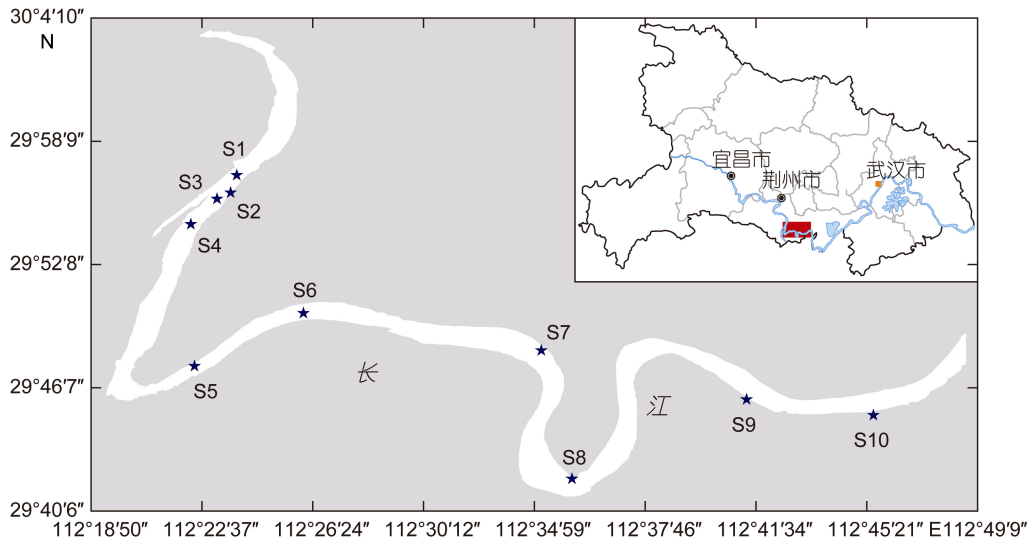


图 1 采样点位置示意图

Fig.1 The study area and sampling sites

## 1.2 样品采集

浮游植物定性样品用 25 号浮游生物网在表层水 0.5m 处以 20—30cm/s 的速度做“8”字形缓慢拖动 5—10min, 待水滤去后, 打开阀门将浮游生物倒入贴有标签的标本瓶中。定量样品采用 2.5L 采水器于 0、2、4m 水深处等量取水后, 充分混合采集 1.5L 混合水样。所有样品现场加鲁哥氏液进行固定。样品带回实验室后采取视野法计数并鉴定种类, 并用细胞体积法推算生物量(章宗涉等, 1991; 胡鸿钧等, 2006)。

水温、pH、电导率、氧化还原电位(ORP)、溶解氧(DO)、总溶解性固体(TDS)等指标使用便携式多参数水质分析仪(YSI plus)原位检测。浮游植物定量样品采集获取的混合水样, 除浮游植物定量分析外, 部分水样酸化后带回实验室采用相应的标准方法分析总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮、硝态氮、高锰酸钾盐指数(COD<sub>Mn</sub>)等指标, 剩余部分现场抽滤(Whatman GF/C)后, 采用便携式冷冻冰箱带回实验室检测叶绿素 *a* (chl *a*)。具体分析按照《水和废水监测分析方法(第四版)》(国家环境保护总局, 2002)进行。

## 1.3 数据分析

**1.3.1 优势度分析** 浮游植物优势种根据每个种的优势度值(*Y*)来确定:

$$Y = (n_i / N) \times f_i,$$

式中,  $n_i$  为第  $i$  种的个体数,  $N$  为所有种类总个体数,  $f_i$  为出现频率。  $Y$  值大于 0.02 种类为优势种。

**1.3.2 多样性分析** 调查河段的多样性( $\beta$ 多样性)使用修正的 Whittaker 指数(Harrison *et al*, 1992)来表示:

$$\beta = \left\{ \left[ \frac{S}{\bar{\alpha}} - 1 \right] / (n - 1) \right\} \times 100,$$

式中,  $S$  表示总物种数;  $\bar{\alpha}$  是各采样点平均物种个数;  $n$  是采样点个数。  $\beta$  多样性结果从 0(每个样本的种完全相同)到 100(每个样本各有独一无二的种)。

**1.3.3 统计分析** 本研究分别采用浮游植物种类数据和现存量数据与环境因子进行直接梯度分析(direct gradient analysis), 以期从浮游植物数量和质量等不同角度研究浮游植物群落特征结构与环境因子的联系。其中, 浮游植物种类组成采用浮游植物种类数据, 现存量则同时采用基于个体数量的密度数据(cell/L)和基于质量的生物量数据(mg/L)。环境因子则采用水质数据。

由于浮游植物种类组成为 0—1 数据类型, 且基于浮游植物密度和生物量的趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA)中第 1 轴长大小为 3.2, 所以根据数据类型及 DCA 分析中第 1 轴的大小(Šmilauer *et al*, 2014), 本研究采用基于单峰模型的典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)进行排序。CCA 是一种直接梯度分析方法, 可以结合多个环境因子一起分析从而更好地反映群落与环境的关系。具体分析过程中, 浮游植物现存量数据进行对数化处理(Šmilauer *et al*, 2014)。环境因子全部导入排序后, 首先手动剔除方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)大于 10 的环境变量, 确保剩余环境因子变量 VIF < 10 后 (Allison, 1998) 后, 再保留蒙特卡罗置换检验(Monte Carlo Permutation)检验有

效的环境变量( $P < 0.05$ )。

排序分析采用 Canoco 5.0 软件完成。其他分析及绘图则采用 office 365 完成。

## 2 结果

### 2.1 种类组成特征

本研究 4 次采样共检出浮游植物 104 种, 其中硅藻门 58 种, 甲藻门 4 种, 金藻门 3 种, 蓝藻门 11 种, 裸藻门 2 种, 绿藻门 23 种, 隐藻门 3 种(表 1)。年度出现频次超过 50% 的主要是: 硅藻门 10 种, 分别为变异直链藻(*Melosira varians*)、奇异杆状藻(*Bacillaria paradoxa*)、小环藻(*Cyclotella* sp.)、尖针杆藻(*Synedra acus*)、曲壳藻(*Achnanthes* sp.)、美丽星杆藻(*Asterionella Formosa*)、肘状脆杆藻(*Fragilaria ulna*)、颗粒直链藻最窄变种螺旋变形(*Melosira granulata* var. *angustissima* f. *spiralis*)、谷皮菱形藻(*Nitzschia palea*)、颗粒直链最窄变种藻(*Aulacoseira granulata* var. *angustissima*); 蓝藻门的小席藻(*Phormidium tenue*)、色球藻(*Chroococcus* sp.); 隐藻门的卵形隐藻(*Cryptomonas ovata*)和尖尾蓝隐藻(*Chroomonas acuta*)。

浮游植物无论种类, 还是出现频次均以硅藻门种类为首, 其次是绿藻门和蓝藻门种类。不过隐藻门

种类虽只有 3 种, 但是其中有两种出现频次均超过了 50%, 也属出现频次较高的门类。这与优势度分析结果类似, 即春季主要是隐藻门浮游植物, 夏季则是硅藻和隐藻, 秋季则是绿藻, 冬季则以硅藻为主(表 2)。进一步从物种多样性来看, 秋季调查河段物种多样性最高, 而冬季最低(表 2), 这也表明夏秋换季时, 浮游植物种类变化明显。

### 2.2 现存量密度及生物量变化

调查河段四次采样点的浮游植物细胞密度变动范围在  $1.93 \times 10^5$ — $9.12 \times 10^6$  cell/L 之间, 平均值为  $2.18 \times 10^6$  cell/L; 生物量变动范围在 0.12—5.31 mg/L 之间, 平均值为 2.00 mg/L。浮游植物细胞密度与生物量的四次采样的基本情况见表 3。从表中可以看到春季浮游植物密度最高, 是秋季浮游植物密度的 5 倍; 而生物量也是春季最高, 但是和第二位的夏季浮游植物生物量相差不大。

从浮游植物密度组成来看(图 2), 浮游植物密度组成年平均中硅藻比例最高, 其次是隐藻和蓝藻, 三者合计占 90% 以上。从季节来看, 春季主要是隐藻和蓝藻, 分别占 47.31% 和 33.92%; 秋季则主要是硅藻、绿藻和蓝藻, 分别占比为 32.56%、32.89%、30.48%, 三者相差不大; 冬季和夏季硅藻密度最高, 均超过了 50%, 隐藻位居其后。

表 1 各门类浮游植物种数和所占比例  
Tab.1 The number and proportion of phytoplankton species

组成	蓝藻门	金藻门	硅藻门	甲藻门	裸藻门	绿藻门	隐藻门	合计
种	12	3	58	4	2	22	3	104
百分比(%)	11.54	2.88	55.77	3.85	1.92	21.15	2.88	100.00

表 2 各季节浮游植物优势度超过 0.2 的种类分布与  $\beta$  多样性  
Tab.2 The species with the dominance over 0.2 and  $\beta$  biodiversity

季节	优势度超过 0.2 的种类	$\beta$ 多样性
春季	尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i> (0.38)	42.64
夏季	颗粒直链最窄变种藻 <i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> (0.29)、卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovate</i> (0.24)	50.03
秋季	多形丝藻 <i>Ulothrix variabilis</i> (0.28)	52.73
冬季	颗粒直链最窄变种藻 <i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> (0.34)、小环藻 <i>Cyclotella</i> sp. (0.32)	33.85

表 3 浮游植物密度与生物量  
Tab.3 The density and biomass of the phytoplankton

季节	最大值		最小值		平均值	
	密度( $\times 10^6$ cell/L)	生物量(mg/L)	密度( $\times 10^6$ cell/L)	生物量(mg/L)	密度( $\times 10^6$ cell/L)	生物量(mg/L)
春	9.12	5.23	2.45	1.73	4.16	2.95
夏	3.44	5.31	0.96	1.74	1.94	2.86
秋	1.28	2.52	0.19	0.12	0.80	0.56
冬	2.41	2.48	1.56	1.36	1.83	1.63

从浮游植物生物量组成来看(图 3), 则以硅藻、隐藻为主, 两者合计占了 94%以上。从四季来看, 除了秋季绿藻门能占到 24.14%外, 其余季节均以硅藻门和隐藻门为主。其中春、夏季隐藻门占了 52.66%和 72.72%。秋、冬季则是硅藻门占了 65.25%和 79.86%。

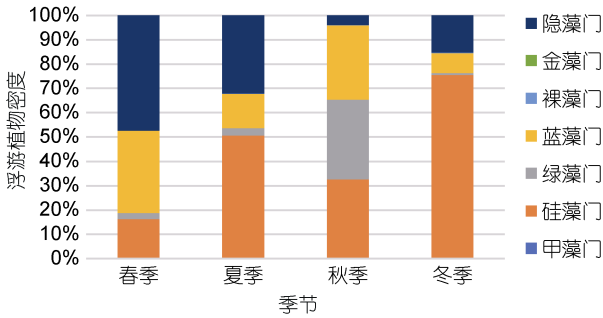


图 2 各季节浮游植物密度组成

Fig.2 The proportion of phytoplankton densities in four seasons

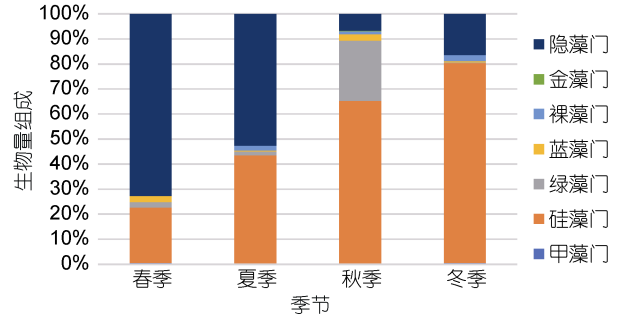


图 3 浮游植物各季节生物量组成

Fig.3 The proportion of biomass in four seasons

### 2.3 典范对应分析排序

CCA 分析的基本统计信息见表 4。结果显示采用物种/密度/生物量~环境因子以及站位~环境因子关系的双序图表示(图 4, 5)。图中环境因子用带有箭头的线段表示, 向量长短表示其在主轴中的作用, 线段所处象限代表环境因子与排序轴间的正负关系。

表 4 CCA 统计信息

Tab.4 The information of CCA analysis

统计特征值		排序轴 1	排序轴 2	排序轴 3	排序轴 4
物种数据	特征值	0.2654	0.1958	0.1670	0.1181
	物种-环境数据累积解释率	20.33	35.34	48.13	57.18
生物密度	特征值	0.3405	0.2334	0.1578	0.1184
	密度-环境数据累积解释率	30.73	51.80	66.04	76.72
生物量数据	特征值	0.3438	0.2305	0.1578	0.1190
	生物量-环境数据累积解释率	31.17	52.06	66.37	77.16

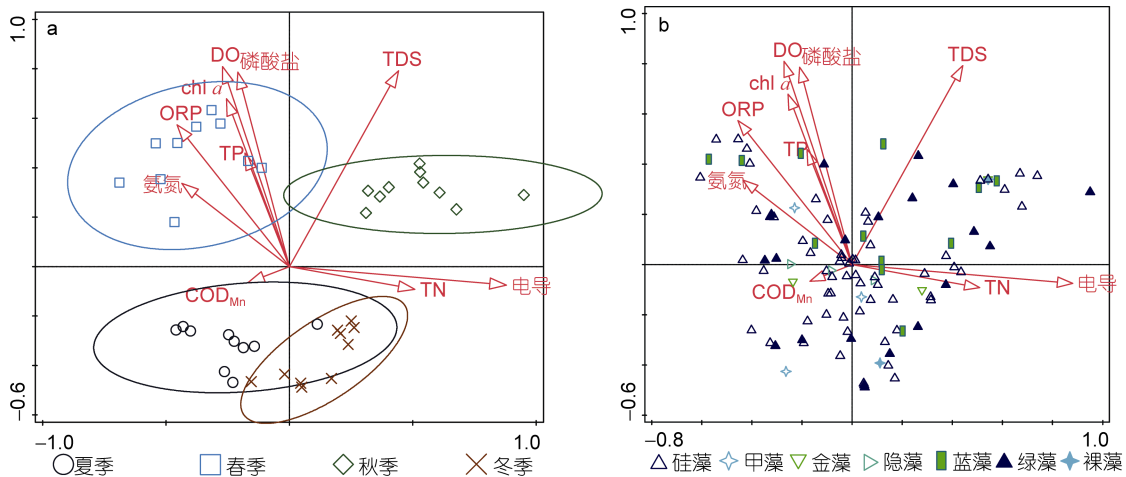


图 4 浮游植物物种数据 CCA 双序图

Fig.4 The biplot based on the phytoplankton species

注: a: 站位~环境因子; b: 种类~环境因子; ORP: 氧化还原电位; DO: 溶解氧; TDS: 总溶解性固体; TN: 总氮; TP: 总磷; COD<sub>Mn</sub>: 高锰酸钾盐指数; chl a: 叶绿素 a

物种数据的 CCA 排序图显示第 1 轴(横轴)主要与电导、TN 呈正相关, 而与氨氮、ORP 等呈负相关, 第 2 轴则主要与磷酸盐、叶绿素 *a*、TP 呈正相关。春、夏、秋、冬四季各站点分别位于第 2、第 3、第 1 与第 4 象限, 空间位置上完全区分开来

(图 4)。

现存量数据排序图则显示 TN、电导与第 1 轴正相关, 第 2 轴主要与磷酸盐相关性较好, 不同季节采样点在四个象限的分布类似, 都是春、夏、秋、冬分别位于第 3、第 2、第 1 和第 4 象限(图 5, 6)。

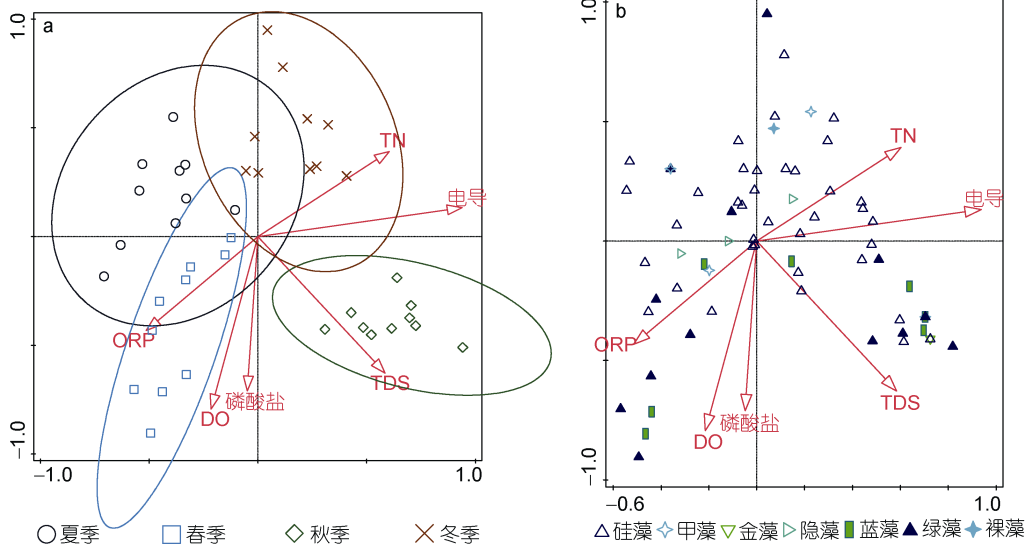


图 5 基于浮游植物密度的 CCA 双序图

Fig.5 The biplot based on the phytoplankton density

注: a: 站位~环境因子(密度); b: 种类~环境因子(密度)

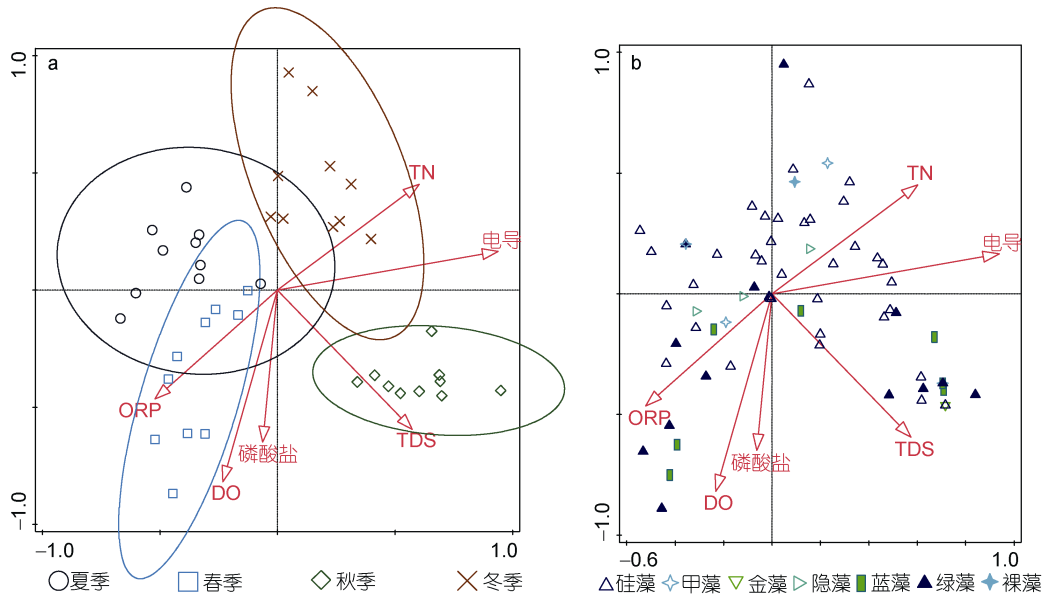


图 6 基于浮游植物生物量的 CCA 双序图

Fig.6 The biplot based on the phytoplankton biomass

注: a: 站位~环境因子(生物量); b: 种类~环境因子(生物量)

### 3 讨论

物种数据和现存量数据的 CCA 分析均显示不同

调查时段的采样点在排序图中被完全区分开来, 表明不同季节的浮游植物群落结构差异明显。物种数据 CCA 分析和现存量数据 CCA 分析结果显示的四季对

应象限并不相同, 不过比较对应优势种类, 可以看到两者规律类似。图 4(物种数据)中硅藻主要集中于横轴下方第 3 和第 4 象限内, 即主要出现于冬季与夏季, 而蓝藻则更多地集中于横轴上方第 1 和第 2 象限内, 主要出现于春秋两季, 另一主要门类绿藻的分布则相对均匀; 而图 5、图 6(密度和生物量)则显示硅藻主要出现于横轴上方, 但也同样对应于夏、冬两季, 而相应地绿藻和蓝藻则主要分布于横轴下方, 即对应于春、秋两季。结果表明, 物种数据和现存量数据均显示在干流春、秋两季蓝绿藻占优, 而硅藻则主要夏冬两季占优。进一步分析环境因子, 也可以看到图 4 中春季水体浮游植物现存量主要受磷酸盐、氨氮、DO、chl *a* 的影响, 而冬季则是 TN 影响更为突出, 并且水体中氮、磷营养水平对夏季和冬季影响都不大。

不同类型的水体浮游植物群落结构具有不同的特征(Bellinger *et al.*, 2015; 胡俊等, 2016, 2017)。浮游植物作为水生态系统的重要组成部分, 其种类组成、数量分布及丰度通常呈季节性变化(吴洁等, 2001)。例如, 在没有人为污染的自然淡水水体中, 浮游植物季节性变化的一般规律是: 春、秋季以喜低温的硅藻、金藻为主; 夏季以喜高温的蓝藻、绿藻为主; 冬季浮游植物种类和数量都很少, 浮游植物群落的季节演替是从冬、春季硅藻到夏、秋季绿、蓝藻大量繁殖再到冬季的硅藻(Temponeras *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2007; 陈家长等, 2009)。中营养型湖泊常以甲藻、隐藻和硅藻类占优势, 富营养型湖泊则常以绿藻和蓝藻类占优势(马健荣等, 2013)。本研究中, 春季水体中较高的磷酸盐、氨氮以及光照, 都是有助于蓝藻生长的因素, 表明春季蓝藻的大量增殖是受到了营养因子的促进作用, 符合通常的浮游植物季节演替规律。同期间河段中浮游植物密度最高的是隐藻, 虽然隐藻在营养较高的水体中也容易出现(Bellinger *et al.*, 2015), 不过主要出现在横轴附近(图 5, 6), 表明其受到营养水平影响很小。冬季, 则主要是 TN 含量和电导率较高(图 4, 5), TN 也反映了水体营养水平, 不过一般而言, 浮游植物主要吸收的是氨氮形式的氮元素, 较高电导表明水体可溶性离子含量较高。事实上, 大多数水华硅藻的生长最适温度低于蓝绿藻(Reynolds, 2006), 所以冬季低温时硅藻无论数量或是种类均显著占优。

另外值得关注的是调查河段夏季浮游植物中以硅藻为主, 并非以蓝绿藻为主, 这可能与该河段营养水平总体较低有关, 本次调查 TP 平均值约为

0.15mg/L, 介于 II 类 III 类之间。浮游植物没有或仅有微弱的运动能力, 主要是随波漂流, 调查河段作为下荆江的一部分, 属于长江中下游河流相对湍急的河段。河流的流速、水量等水文情势必然对浮游植物的组成起着重要作用(Soballe *et al.*, 1987; 朱英等, 2008; 张怡等, 2012)。本研究中, 由于缺乏水文数据并未能将其纳入 CCA 的分析当中。事实上, 在 CCA 分析中物种/现存量~环境因子解释率为 57%—77%(表 5), 说明还有其他的环境因子对浮游植物群落存在影响。已有研究发现长江干流浮游植物与营养盐无显著的相关性, 更多可能是水文条件起了重要作用(曾辉, 2006)。调查河段最高水位出现在 6—9 月间, 受季风、梅雨影响以及洞庭湖出口来水顶托, 其水位变幅较大。最低水位一般出现在 2—3 月份, 水位变化幅度较小。径流量各月分布不均匀, 每年 4 月进入汛期, 到 10 月结束, 该时段水量较为充沛。夏季处于汛期, 属于水位最高时期。期间虽然光照充足, 但水流速度加快, 水体混合相对剧烈, 且水体浑浊, 削弱了蓝藻对硅藻的光竞争优势, 反而有利于喜流水性、耐混浊的硅藻生长(Huisman *et al.*, 1999, 李世健等, 2012, Bellinger *et al.*, 2015)。

此外, 秋季处于夏冬季之间, 本研究中秋季浮游植物密度和现存量均低于其他季节。考虑到本次秋季采样为 10 月份, 冬季采样为 1 月, 分别处于丰水期和枯水期, 故秋季浮游植物现存量低于冬季可能是由于不同水期江段水体容积量变小, 对水体中浮游植物等水生生物产生浓缩现象, 由此导致了全江段枯水期的浮游植物密度远大于丰水期的密度, 长江其他江段也有类似现象报道(陈校辉等, 2006)。因此, 水文情势可能对干流浮游植物群落起了重要作用(Naselli-Flores, 2000; 孙静等, 2015)。

## 4 结论

此次调查显示长江天鹅洲白鱓豚国家级自然保护区长江段浮游植物共 7 门 104 种, 种类组成以硅藻、绿藻和蓝藻为主, 优势种多为硅藻、隐藻和绿藻。全年来看, 硅藻和隐藻现存量均占优, 但春秋两季时蓝藻门浮游植物密度突出。CCA 分析显示该河段浮游植物季节演替明显, 但各季节主要浮游植物种类变化具有自身特点, 即春秋两季蓝藻门浮游植物密度较高, 而冬夏季硅藻为主, 进一步分析显示这种特征除了与水质因子有关外, 该河段的水文情势也起了重要作用, 还有待深入研究。

总之,通过这次调查有助于更好地了解荆江河段的浮游植物群落结构特征,也为开展该区域的生态环境演变分析提供了重要的科学数据支撑。

### 参 考 文 献

- 马健荣, 邓建明, 秦伯强等, 2013. 湖泊蓝藻水华发生机理研究进展. *生态学报*, 33(10): 3020—3030
- 王 越, 丁艳荣, 范北林, 2011. 三峡工程蓄水后荆江河段河势变化及生态护岸研究. *长江流域资源与环境*, 20(S1): 117—122
- 王江涛, 曹 婧, 2012. 长江口海域近 50a 来营养盐的变化及其对浮游植物群落演替的影响. *海洋环境科学*, 31(3): 310—315
- 孙 静, 甄 毓, 米铁柱, 2015. 长江干流浮游植物群落结构的 DGGE 分析. *中国海洋大学学报*, 45(10): 96—102
- 朱 英, 顾詠洁, 王 耘等, 2008. 苏州河水文条件变化对浮游植物群落的影响. *华东师范大学学报(自然科学版)*, (2): 30—36, 106
- 吴 洁, 虞左明, 2001. 西湖浮游植物的演替及富营养化治理措施的生态效应. *中国环境科学*, 21(6): 540—544
- 张 远, 郑丙辉, 刘鸿亮, 2006. 三峡水库蓄水后的浮游植物特征变化及影响因素. *长江流域资源与环境*, 15(2): 254—258
- 张 怡, 胡 韧, 肖利娟等, 2012. 南亚热带两座不同水文动态的水库浮游植物的功能类群演替比较. *生态环境学报*, 21(1): 107—117
- 张 磊, 夏志强, 周 伟等, 2015. 三峡水库春季营养盐和浮游植物空间分布及其影响机制. *环境科学研究*, 28(7): 1069—1077
- 李世健, 范振华, 任玉芹等, 2012. 长江中游宜昌至城陵矶江段浮游植物群落结构的周年变化特征. *长江流域资源与环境*, 21(S1): 62—68
- 李俊龙, 郑丙辉, 刘录三等, 2013. 长江口浮游植物群落特征及其与环境的响应关系. *环境科学研究*, 26(4): 403—409
- 陈家长, 孟顺龙, 尤 洋等, 2009. 太湖五里湖浮游植物群落结构特征分析. *生态环境学报*, 18(4): 1358—1367
- 陈校辉, 陈学进, 唐建清等, 2006. 长江江苏段浮游植物群落结构特征调查报告. *水产养殖*, 27(4): 11—16
- 国家环境保护总局, 2002. 水和废水监测分析方法. 4版. 北京: 中国环境科学出版社
- 胡 俊, 杨玉霞, 池仕运等, 2017. 邕山提灌站浮游植物群落结构空间变化对环境因子的响应. *生态学报*, 37(3): 1054—1062
- 胡 俊, 胡 鑫, 米玮洁等, 2016. 多沙河流夏季浮游植物群落结构变化及水环境因子影响分析. *生态环境学报*, 25(12): 1974—1982
- 胡鸿钧, 魏印心, 2006. 中国淡水藻类——系统、分类及生态. 北京: 科学出版社
- 栾青杉, 孙 军, 宋书群等, 2007. 长江口夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析. *植物生态学报*, 31(3): 445—450
- 章宗涉, 黄祥飞, 1991. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社
- 曾 辉, 2006. 长江和三峡库区浮游植物季节变动及其与营养盐和水文条件关系研究. 武汉: 中国科学院研究生院(水生生物研究所)博士学位论文
- 薛兴华, 袁龙义, 2012. 河流景观生态学视角下三峡工程对荆江河段的生态效用分析. *长江大学学报(自然科学版)*, 9(3): 15—19, 23
- Allison P D, 1998. *Multiple Regression: A Primer*. California: Pine Forge Press
- Bellinger E G, Sigeo D C, 2015. *Freshwater Algae: Identification, Enumeration and Use as Bioindicators*. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell
- Harrison S, Ross S J, Lawton J H, 1992. Beta diversity on geographic gradients in Britain. *Journal of Animal Ecology*, 61(1): 151—158
- Huisman J, Jonker R R, Zonneveld C *et al*, 1999. Competition for light between phytoplankton species: experimental tests of mechanistic theory. *Ecology*, 80(1): 211—222
- Lepistö L, Holopainen A L, Vuoristo H, 2004. Type-specific and indicator taxa of phytoplankton as a quality criterion for assessing the ecological status of Finnish boreal lakes. *Limnologica - Ecology and Management of Inland Waters*, 34(3): 236—248
- Naselli-Flores L, 2000. Phytoplankton assemblages in twenty-one Sicilian reservoirs: relationships between species composition and environmental factors. *Hydrobiologia*, 424(1—3): 1—11
- Reynolds C S, 2006. *The Ecology of Phytoplankton*. London: Cambridge University Press
- Rodrigues L C, Simões N R, Bovo-Scomparin V M *et al*, 2015. Phytoplankton alpha diversity as an indicator of environmental changes in a neotropical floodplain. *Ecological Indicators*, 48: 334—341
- Šmilauer P, Lepš J, 2014. *Multivariate Analysis of Ecological Data Using Canoco 5*. 2nd ed. New York: Cambridge University Press
- Soballe D M, Kimmel B L, 1987. A large-scale comparison of factors influencing phytoplankton abundance in rivers, lakes, and impoundments. *Ecology*, 68(6): 1943—1954
- Temponeras M, Kristiansen J, Moustaka-Gouni M, 2000. Seasonal variation in phytoplankton composition and physical-chemical features of the shallow Lake Doīrani, Macedonia, Greece. *Hydrobiologia*, 424(1—3): 109—122
- Wang X L, Lu Y L, He G Z *et al*, 2007. Exploration of relationships between phytoplankton biomass and related environmental variables using multivariate statistic analysis in a eutrophic shallow lake: A 5-year study. *Journal of Environmental Sciences*, 19(8): 920—927

## STUDY ON PHYTOPLANKTON COMMUNITY STRUCTURE AND ITS RELATIONSHIP WITH ENVIRONMENTAL FACTORS IN TIAN'E SECTION, CHANGJIANG RIVER

HU Jun<sup>1</sup>, GONG Cheng<sup>2</sup>, XIA Wei<sup>3</sup>, CHI Shi-Yun<sup>1</sup>, CHEN Ming-Xiu<sup>1</sup>, LI Si-Xin<sup>1</sup>

(1. *Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Project and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Wuhan 430079, China;*

2. *Baiji National Nature Reserve Management Office of Xintankou-Luoshan of the Yangtze River in Hubei Section, Shishou 434400, China;* 3. *Changjiang Waterway Bureau, Wuhan 430060, China)*

**Abstract** The phytoplankton community structure and its relationship with the environmental factors was studied in four seasons in the Tian'e (Swan) Section, a part of the nature reserve for white dolphin, in the middle reach of Changjiang (Yangtze) River, to reveal the community characteristics of phytoplankton and further provide data for ecological protection and research in the area. From 2014 to 2015, an investigation was quarterly carried out in 10 sampling sites along the section and water quality factors such as water temperature, dissolved oxygen and total phosphorus were synchronously measured. Canonical correspondence analysis (CCA) was applied to analyze the phytoplankton community structure and its relationship with the environmental factors in the four seasons. The results show that the main species of phytoplankton were diatoms, chlorophytes and cyanobacteria; the diatoms and cryptophytes were dominant in the biomass composition in the whole year, but the chlorophytes and cyanobacteria were dominant in the density composition in spring and autumn. CCA analysis further indicated that the total phosphorus, dissolved oxygen and oxidation reduction potential (ORP) significantly affected the phytoplankton community structure in spring, while the hydrological factors could play a more important role in summer and winter.

**Key words** Changjiang River; phytoplankton; community structure; environmental factors; canonical correspondence analysis (CCA)