

DOI: 10.5846/stxb201609131852

任辉, 田恬, 杨宇峰, 王庆. 珠江口南沙河涌浮游植物群落结构时空变化及其与环境因子的关系. 生态学报, 2017, 37(22): 7729-7740.

Ren H, Tian T, Yang Y F, Wang Q. Spatial and temporal distribution of phytoplankton community and its relationship with environment factors in Nansha's Rivers, Pearl River estuary. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(22): 7729-7740.

珠江口南沙河涌浮游植物群落结构时空变化及其与环境因子的关系

任 辉^{1,2,3}, 田 恬^{1,2,3}, 杨宇峰^{1,2,3}, 王 庆^{1,2,3,*}

1 暨南大学生态学系, 广州 510632

2 水体富营养化与赤潮防治广东省教育厅重点实验室, 广州 510632

3 热带亚热带水生态工程教育部工程研究中心, 广州 510632

摘要:随着城市生态健康理念的提出, 城市河涌生态健康也受到了前所未有的关注。为更好的了解河涌的水环境和浮游植物现状, 于 2015 年 3 月至 2016 年 2 月对珠江口南沙河涌 8 个站位水环境和浮游植物群落结构进行调查。结果显示: 共发现浮游植物 164 种(属), 隶属 7 门 73 属, 其中以绿藻种类最多, 达 33 属 79 种, 占 48.17%; 硅藻次之, 17 属 41 种, 占 25%。优势种为梅尼小环藻 (*Cyclotella meneghiniana*)、假鱼腥藻属 (*Pseudanabaena* sp.) 和小球藻 (*Chlorella vulgaris*)。浮游植物细胞密度在 0.19×10^6 — 101.34×10^6 个/L 内变动, 呈现单峰型, 在 4 月发生拟菱形弓形藻 (*Schroederia nitzschoides*) 水华, 14 涌密度高达 87.38×10^6 个/L, 随后因强降雨细胞密度骤降。浮游植物群落的时间演替基本符合 PEG (Plankton Ecology Group) 模型, 从冬季的硅藻, 到春夏季的绿藻, 再到秋季的蓝藻。One-way ANOVA 分析显示, 各月份浮游植物细胞密度差异显著 ($P < 0.01$)。Pearson 相关性分析表明绿藻细胞丰度变化主导着浮游植物总丰度的变化 ($r = 0.454, P < 0.01$)。运用 Margalef 物种丰富度指数、Shannon 物种多样性指数、Pielou 均匀度指数对水体进行评价表明, 调查水体呈中度污染。相关加权营养状态指数表明, 河涌全年处于富营养化状态。浮游植物聚类分析表明, 时间异质性较高, 总体相似性较低; 空间上相似性较高, 人为活动可能是导致空间差异的关键因子。冗余分析显示, 叶绿素 a、溶解氧、盐度、水温、总氮和 pH 与浮游植物群落结构关系最为密切。pH 对硅藻门浮游植物影响较大, 碱性条件适宜直链藻生长, 春季水华形成的驱动因子是盐度、温度和总氮。

关键词: 珠江口; 河涌; 浮游植物; 聚类分析; 冗余分析

Spatial and temporal distribution of phytoplankton community and its relationship with environment factors in Nansha's Rivers, Pearl River estuary

REN Hui^{1,2,3}, TIAN Tian^{1,2,3}, YANG Yufeng^{1,2,3}, WANG Qing^{1,2,3,*}

1 Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China

2 Key Laboratory of Eutrophication and Red Tide Control, Education Department of Guangdong Province, Guangzhou 510632, China

3 Engineering Research Center for Tropical and Subtropical Aquatic Ecological Engineering, Ministry of Education, Guangzhou 510632, China

Abstract: The concept of urban ecological health has increased concern over the ecological health of urban rivers. Therefore, in order to study the spatial and temporal distribution of phytoplankton communities and the water quality of Nansha's rivers, Pearl River estuary, eight sites were sampled on a monthly basis from March 2015 to February 2016. During this period, 164 phytoplankton species, from 7 phyla and 73 genera, were recorded. The most diverse group was the green algae (79 spp., 33 genera), which accounted for 48.17% of the total recorded species, followed by diatoms

基金项目: 国家自然科学基金 (U1301235, 41503072); 公益性行业(农业)科研专项 (201403008); 广东省自然科学基金 (S2012040006824); 高等学校博士学科点专项科研基金 (20124401120013)

收稿日期: 2016-09-13; **网络出版日期:** 2017-05-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wq2010@jnu.edu.cn

(41 spp., 17 genera), which accounted for 25% of the total recorded species, and the dominant species included *Cyclotella meneghiniana*, *Pseudanabaena* sp., and *Chlorella vulgaris*. The overall abundance ranged from 0.19×10^6 to 101.34×10^6 cells/L and exhibited a unimodal pattern of seasonal variation. The peak abundance corresponded to an algal bloom that occurred in April 2015, during which the dominant species, *Schroederia nitzschoides*, reached 87.38×10^6 cells/L at site 14 (S14) and then rapidly decreased over the next month. The seasonal succession of the phytoplankton community structure in Nansha's rivers conformed to the Plankton Ecology Group (PEG) Model, with Chlorophyta dominating during the spring and summer, Cyanophyta dominating during the end of summer and autumn, and Bacillariophyta dominating during the winter. The temporal variation of phytoplankton density was significant ($P < 0.01$), as was the positive correlation of the proportion of Chlorophyta cells in total phytoplankton abundance ($r = 0.454$, $P < 0.01$). The Shannon-Wiener diversity, Margalef abundance, Pielou evenness, and trophic state indices indicated that Nansha's rivers were experiencing moderate eutrophication. Cluster analysis indicated that the phytoplankton communities possessed high temporal heterogeneity but low spatial heterogeneity. Human activities maybe the key factor for spatial differences. Meanwhile, redundancy analysis (RDA) indicated that chlorophyll *a*, salinity, dissolved oxygen, water temperature, total nitrogen, and pH were most closely related to the phytoplankton community structure, and pH significantly affected the abundance and species of Bacillariophyta, with alkaline environments benefiting *Melosira*, in particular. Salinity, water temperature, and total nitrogen were the driving factors of the spring algal bloom.

Key Words: Pearl River estuary; urban river; phytoplankton; cluster analysis; redundancy analysis (RDA)

河口可看作是淡水与海洋生物栖息地之间的生态交错区,该区域的环境因子变化与河流和海洋均有差异,具有自己的特殊性^[1-2]。珠江流经广州南沙区,贯穿其中形成交错复杂的河涌,受到珠江径流和海水的共同影响,同时河涌周围大多为居民生活区,受生活垃圾和污水的影响严重。

浮游植物是河口区水生生态系统的重要初级生产者,在生态系统的物质循环与能量转换中起重要作用,为浮游动物提供直接的食物来源^[3]。同时浮游植物已成为生物监测以及评价水质和水体营养状况的重要生物指标,在国内外已被广泛采用^[4-5]。

珠江干流、珠江广州河段、珠江口已经有相关研究报道^[6-7],但对珠江口城市河涌研究未有报道。本研究对珠江口南沙河涌进行为期 1 年的周年调查,探讨浮游植物分布与环境因子之间的关系,以期为城市河涌的保护和治理提供参考。

1 材料与方法

1.1 采样区域与站位布设

2016 年 3 月至 2017 年 2 月对珠江口广州南沙河涌进行调查,选取 8 条河涌,设置 8 个采样点,分别为 2 涌(S2)、6 涌(S6)、8 涌(S8)、12 涌(S12)、14 涌(S14)、16 涌(S16)、19 涌(S19)、21 涌(S21),依次从内陆到河口,采样频率为每月 1 次,其中 2 涌沿岸有施工工地,6 涌、12 涌、16 涌位于居民区沿岸居民较多,8 涌沿岸有餐饮店,14 涌沿岸有水产市场污水直接排入河涌,19 涌沿岸有渔人码头,21 涌与河口相连接,涌内有渔船,站点布设如图 1。

1.2 样品收集及处理

用有机玻璃采水器采集 1 L 水样,立即加入水样量 1.5% 体积的鲁哥氏液固定,沉淀 48 h 浓缩至 30 mL,取 0.1 mL 使用浮游植物计数框在显微镜下进行种类鉴定和计数。种类鉴定参照浮游植物的种类鉴定,主要依据《中国淡水藻类——系统、分类及生态》^[8]、《藻类名词及名称》^[9]和《中国常见淡水浮游藻类图谱》^[10],计数参考《淡水浮游生物研究方法》^[11]。水温(WT)、pH、溶解氧(DO)、盐度等指标用 YSI plus 型水质分析仪现场测定,用透明度盘测定水体透明度(SD),实验室测定总氮(TN)、总磷(TP)及叶绿素(Chl. a)^[12]。

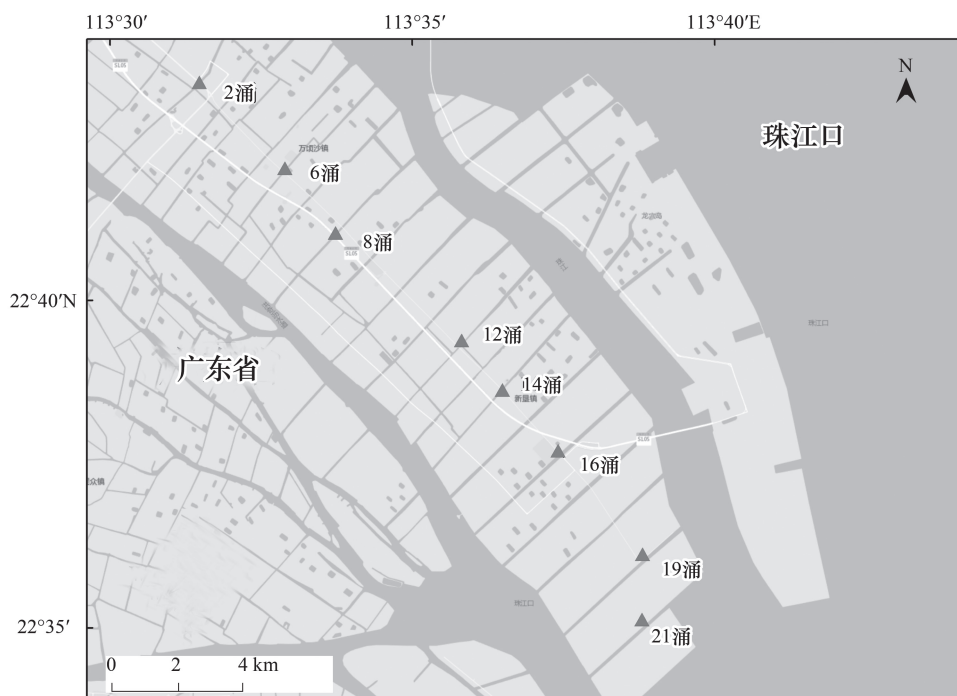


图1 南沙河涌采样站位设置图

Fig.1 Sampling stations in Nansha's Rivers

1.3 数据分析

运用 Margalef 物种丰富度指数(D)、Shannon 物种多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(J)及浮游植物优势度(Y)等参数分析浮游植物群落结构特征。将优势度 $Y > 0.02$ 的藻类定为优势种^[13-14]。

水体富营养化程度采用综合营养指数法^[15,16],公式如下:

$$TLI(\sum) = \sum_{j=1}^m W_j \times TLI(j)$$

式中, $TLI(\sum)$ 表示综合营养状态指数; $TLI(j)$ 代表第 j 种参数的营养状态指数。 W_j 第 j 种参数的营养状态指数的相关权重,它按下述方法进行加权。

以 Chl. a 作为基准参数,则第 j 种参数的归一化的相关权重计算公式为:

$$W_j = \frac{r_{ij}^2}{\sum_{j=1}^m r_{ij}^2}$$

式中, r_{ij} 为第 j 种参数与基准参数 Chl. a 的相关系数^[15]; m 为评价参数的个数。

利用 SPSS 21.0 进行 one-way ANOVA 分析;利用 Origin 9.0 进行图形绘制;利用 ArcGis 10.0 进行站点绘制;利用大型多元统计软件 PRIMER 5.0 对浮游植物群落进行聚类分析;利用 Canoco 4.5 对浮游植物物种和环境数据进行冗余分析(RDA)。

2 结果

2.1 理化数据

调查期间各站点水温全年平均值在 25 °C,最低水温在 7.8 °C,变化范围较大,方差分析表明各月份存在显著差异($P < 0.05$);盐度变化范围不大,最高不超过 5,2 涌到 12 涌盐度全年平均值在 0.5 以下,14 涌至 21 涌盐度全年均值在 1 以上,方差分析表明,2015 年 3 月、4 月和 2016 年 2 月与其余月份存在显著差异($P < 0.05$);总氮全年均值超过 2 mg/L,在 14 涌站点均值达到 4.87 mg/L,远超其他各站点,全年最大值也出现在 14 涌,

高达 13.16 mg/L, 最小值出现在 19 涌, 为 0.9 mg/L, 方差分析表明, 2015 年 4 月显著高于其余月份 ($P < 0.01$); 总磷除 14 涌以外, 其余各站点年均值均低于 0.16 mg/L, 14 涌均值为 0.35 mg/L, 最大值出现在 14 涌, 为 0.94 mg/L, 方差分析表明, 2015 年 11 月显著高于其余月份 ($P < 0.01$); 叶绿素 a 波动范围较大, 最小值出现在 2 涌, 为 1.13 $\mu\text{g/L}$, 最大值出现在 14 涌, 高达 514.78 $\mu\text{g/L}$, 方差分析表明, 2015 年 4 月显著高于其余月份 ($P < 0.01$), 此时出现水华现象, 水华种为拟菱形弓形藻 (*Schroederia nitzschoides*) (图 2)。

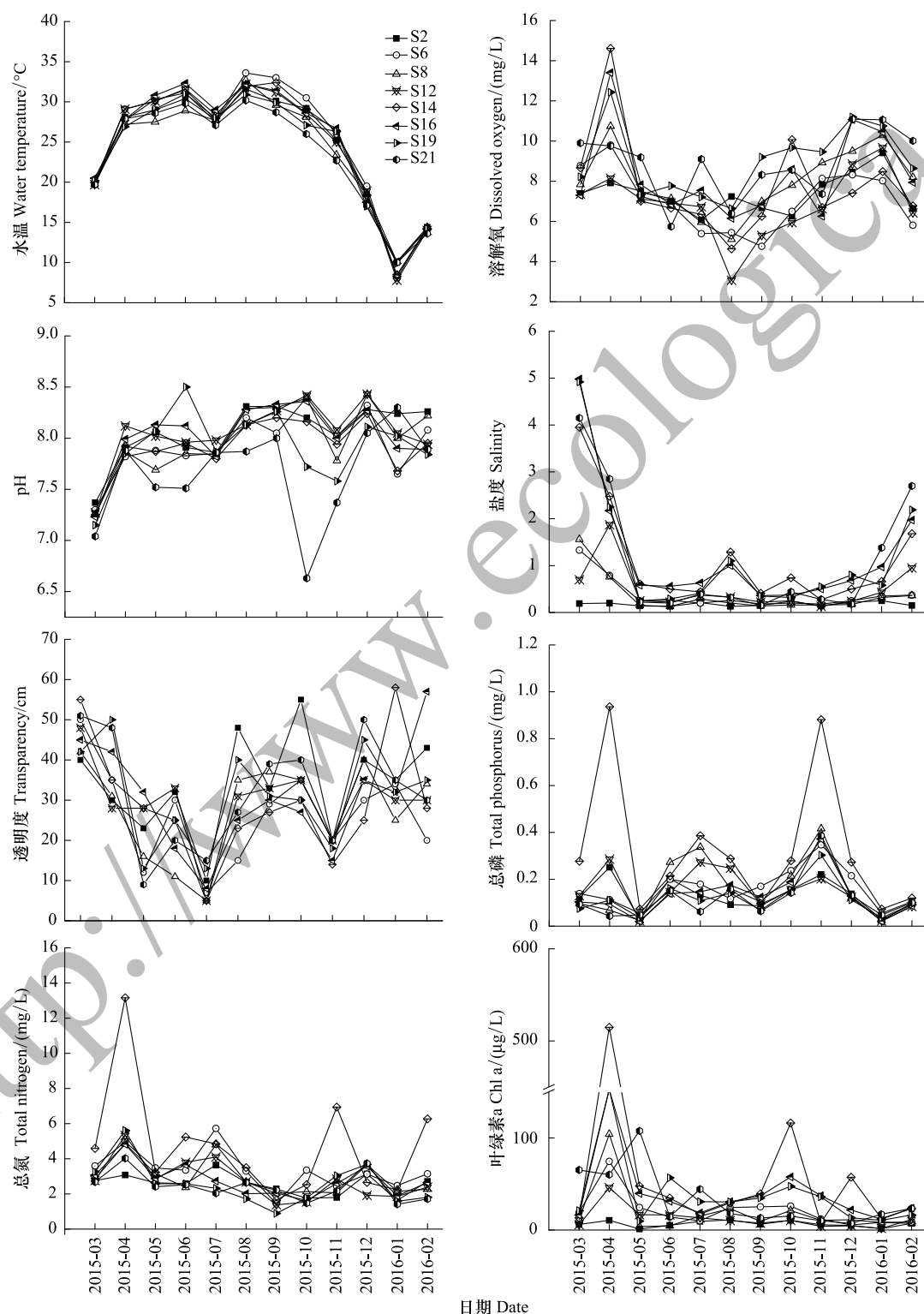


图 2 珠江口南沙河涌水质指标的季节变化

Fig.2 Seasonal changes of water quality indicators in Nansha's Rivers, Pearl River estuary

2.2 浮游植物种类

调查共发现浮游植物 164 种(属),隶属于 7 门 73 属。其中以绿藻种类最多,达 33 属 79 种,占 48.17%;硅藻次之,17 属 41 种,占 25%;裸藻和蓝藻分别为 5 属 18 种和 15 属 23 种;甲藻门、黄藻门和隐藻门各为 1 属 1 种。种类数在 7 月至 11 月最多,10 月份达到最大值 98 种,3 月份种类数最少,仅有 62 种。从组成类群上来看,全年都以硅藻、绿藻和蓝藻占优,所占比例分别为 47%—77%、19%—55%和 13%—35%。

2.3 浮游植物丰度

浮游植物全年细胞丰度范围为 0.10×10^6 — 101.34×10^6 个/L(图 3),周年变化呈单峰型,在 2015 年 4 月达到峰值。时间变化显著,2015 年 4 月浮游植物细胞平均丰度达到 34.97×10^6 个/L,各河涌范围在 8.32×10^6 — 101.34×10^6 个/L,14 涌高达 101.34×10^6 个/L,此时发生拟菱形弓形藻(*S. nitzschoides*)水华,随后 2015 年 5 月因强降雨浮游植物细胞丰度骤降,2016 年 2 月份最低,均值为 0.26×10^6 个/L。统计分析显示,2015 年 4 月份浮游植物细胞丰度显著高于其余月份($P < 0.01$)。空间变化不明显,14 涌站点浮游植物细胞丰度较高,2 涌较低。Pearson 相关性分析表明,浮游植物细胞丰度与硅藻门细胞比例呈极显著负相关($r = -0.349, P < 0.01$),与蓝藻门细胞比例呈显著负相关($r = -0.244, P < 0.05$),与绿藻门细胞比例呈极显著正相关($r = 0.454, P < 0.01$),绿藻门细胞比例与硅藻门($r = -0.620, P < 0.01$)和蓝藻门($r = -0.705, P < 0.01$)细胞比例呈极显著负相关。

优势度大于 0.02 的优势种共有 17 种,其中硅藻门仅有 3 种,绿藻门 8 种,蓝藻门 6 种。梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)、假鱼腥藻属(*Pseudanabaena* sp.)和小球藻(*Chlorella vulgaris*)作为优势种出现最多,12 次调查中出现 9 次,其中小球藻从 2015 年 5 月份开始连续 9 个月为优势种,四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)作为优势种出现 8 次(表 1)。

2.4 浮游植物种类多样性指数及综合营养状态指数

全年各站点 Margalef 物种丰富度指数范围在 0.65—3.14 之间,呈现单峰型变化;Shannon 物种多样性指数范围在 0.63—3.30 之间,均值在 2.36—2.86 之间波动;Pielou 均匀度指数范围在 0.20—0.95,均值在 0.77—0.92 之间波动(图 4)。Shannon 物种多样性指数和 Pielou 均匀度指数显著正相关($r = 0.971, P < 0.01$)。

采用 Chl. *a*、TP、TN、SD 作为水体综合营养状态评价指标,计算得到综合营养状态指数(图 4),对调查区域水质进行富营养化评价。全年大多数月份, $TLI(\sum) > 50$ 表明各条河涌处于富营养状态。在 4 月,除 S2 和 S6 外,其余河涌 $TLI(\sum) > 70$,为重度富营养。

2.5 浮游植物群落聚类分析

对南沙河涌浮游植物种类丰度进行时间聚类分析,在相似水平为 0.22 时,结果明显可分为 3 类,第一类为 2016 年 1 月、2 月和 2015 年 11 月、12 月,第二类为 2015 年 5 月、6 月、7 月、8 月、9 月和 10 月,最后一类为 2015 年 3 月和 4 月;空间上相似性较高,在相似水平 0.46 时,可将 8 个采样站点分为 4 类,第一类为 S14 和 S19,第二类为 S21、S6、S12 和 S16,第三类为 S2,第四类为 S8,其中 S2 和 S14 相似性最低(图 5)。

2.6 浮游植物与环境因子的关系

以水温、总氮、透明度、溶氧、叶绿素 *a*、pH、总磷和盐度 8 个环境因子,对广州南沙河涌浮游植物主要优势种和常见种进行去趋势分析(DCA),排序结果显示四个轴最大长度为 2.179,表明数据进一步分析应该采用基于线性模型的冗余分析(RDA)。数据分析显示,RDA 排序第一轴和第二轴特征值分别为 0.135 和 0.089,种类和环境相关性为 0.827 和 0.754,表明排序轴可较好的反映浮游植物优势种和环境因子之间的关系(表 2)。环境因子与 RDA 分析轴之间的相关性表明,水温、盐度和总氮显著影响物种变量分布,叶绿素 *a*、溶氧、pH 和透明度也在一定程度上影响物种变量分布(表 3)。

3 讨论

3.1 南沙河涌浮游植物群落分布特征

由于存在地域和水体类型差异,不同河流生态系统浮游植物群落的组成和动态存在较大差异^[17-18]。近

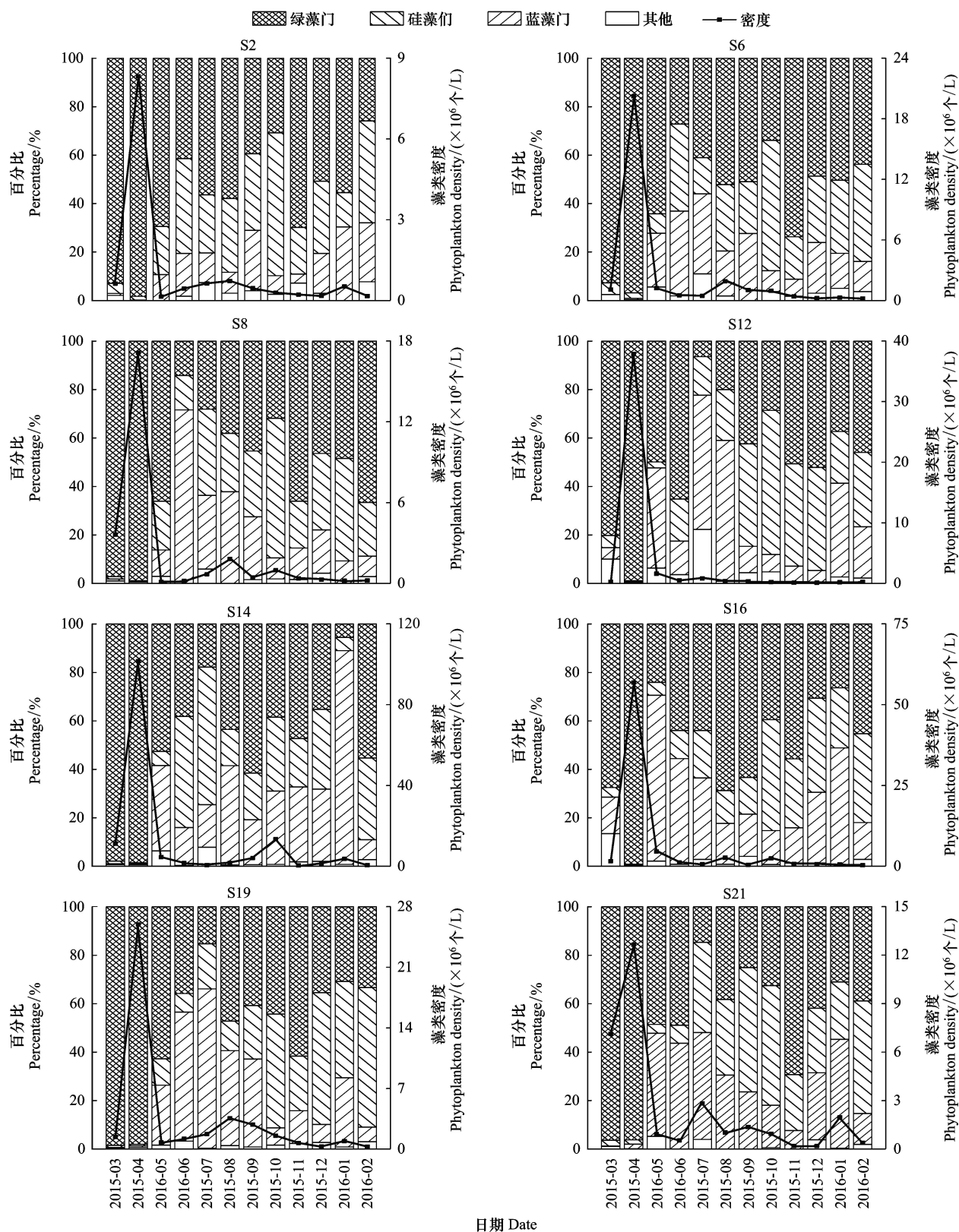


图 3 珠江口南沙河涌浮游植物丰度的季节变化

Fig.3 Seasonal changes of phytoplankton abundance in Nansha's Rivers, Pearl River estuary

① Chlorophyta ② Bacillariophyta ③ Cyanophyta ④ other phytoplankton ⑤ density

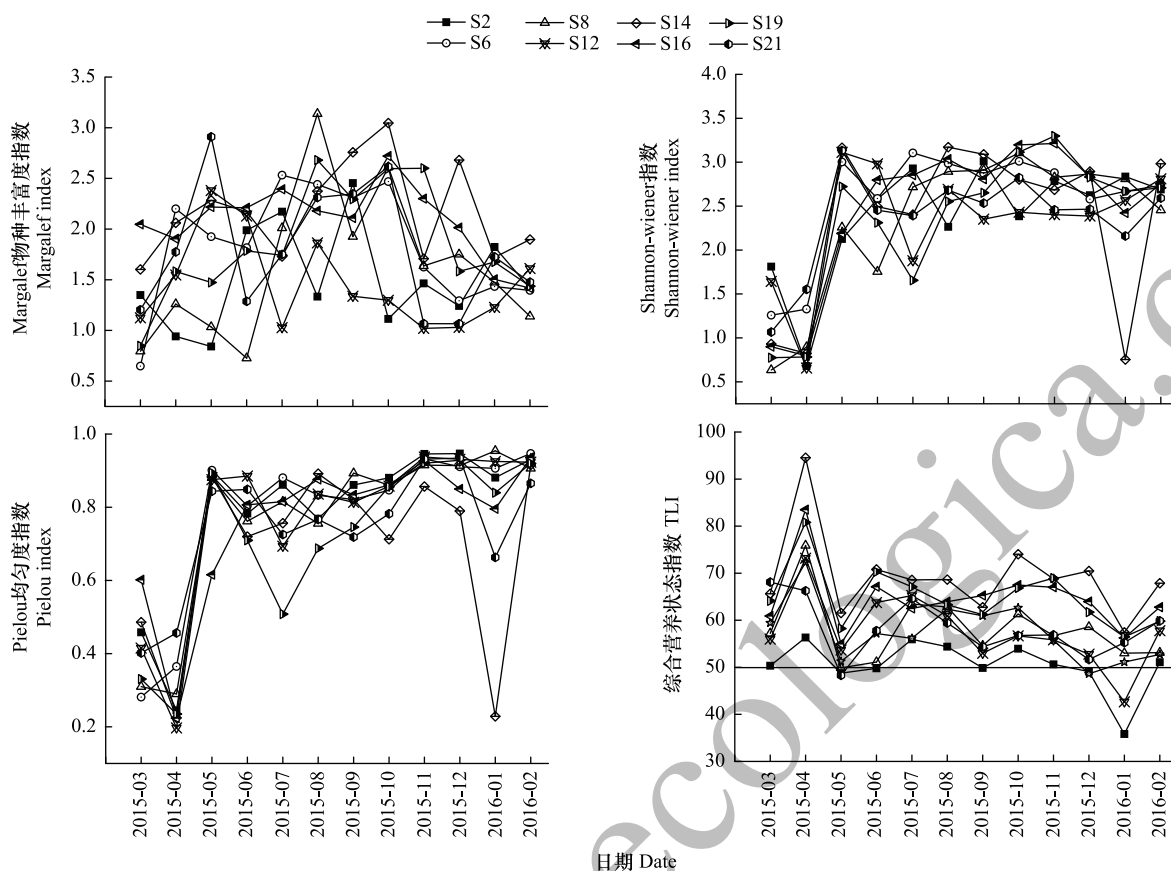


图4 珠江口南沙河涌各指数的季节变化

Fig.4 Seasonal changes of various indexes in Nansha's Rivers, Pearl River estuary

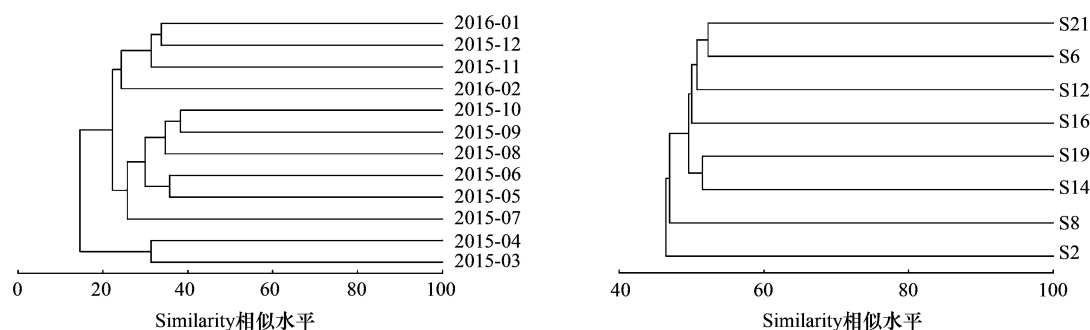


图5 珠江口南沙河涌浮游植物时空聚类图

Fig.5 Dendrogram of phytoplankton in Nansha's Rivers, Pearl River estuary

年来对内陆河流进行研究发现^[19-21],绿藻和硅藻作为主要优势类群,不仅是在数量上占优势,且种类上也有明显优势。调查珠江广州河段发现浮游植物 127 种,细胞丰度在 0.15×10^6 个/L— 28.81×10^6 个/L,主要以假鱼腥藻和颗粒直链藻为优势种,存在明显的季节交替^[22]。对珠三角河网水域的调查共发现浮游植物 383 种^[23]。目前研究认为,硅藻为贫营养型水体的优势种,绿藻为中营养型水体的优势种,而蓝藻为富营养型水体的优势种^[24]。本研究调查共发现浮游植物 164 种(属),主要以绿藻和硅藻为优势种,属绿藻-硅藻型,多样性指数和富营养状态指数评价发现水体呈现中污-富营养的状态。珠江口南沙河涌浮游植物种类数呈现单峰模式,在 7 月至 11 月种类数最多,表现出高温季节高,低温季节低的特点。对 Ganges 江调查发现夏季的浮游植物种类从之前的 37 种增加到 82 种,这与夏季水温升高和高光照有直接关系^[25]。调查期间,在 2015 年

表 1 南沙河涌浮游植物优势种
Table 1 The dominant species in Nansha's Rivers

优势种 Dominant species	时间 Time											
	2015-03	2015-04	2015-05	2015-06	2015-07	2015-08	2015-09	2015-10	2015-11	2015-12	2016-01	2016-02
梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>			+	+	+	+	+	+	+	+		+
变异直链藻 <i>Melosira varians</i>				+		+	+	+				+
颗粒直链藻极狭变种 <i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i>											+	
二形栅藻 <i>Scenedesmus dimorphus</i>			+									
弓形藻 <i>Schroederia setigera</i>	+	+										
空球藻 <i>Eudorina elegans</i>							+					
拟菱形弓形藻 <i>Schroederia nitzschoides</i>	+	+										
四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i>				+	+	+	+	+		+	+	+
四足十字藻 <i>Crucigenia tetrapedia</i>			+				+	+				
小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>			+	+	+	+	+	+	+	+	+	
衣藻属 <i>Chlamydomonas</i> sp.			+		+	+			+	+		
假鱼腥藻属 <i>Pseudanabaena</i> sp.			+	+	+	+	+			+	+	
尖细颤藻 <i>Oscillatoria acuminata</i>				+		+						
巨颤藻 <i>Oscillatoria princeps</i>					+	+						
蓝纤维藻属 <i>Dactylococopsis</i> sp.							+	+				
膨胀色球藻 <i>Chroococcus turgidus</i>				+		+	+		+	+		+
微小隐球藻 <i>Aphanocapsa delicatissima</i>			+									

表 2 珠江口南沙河涌浮游植物优势种 RDA 分析统计信息

Table 2 Summary statistics for the axes of RDA performed on dominant species in Nansha's Rivers, Pearl River estuary

轴 Axes	1	2	3	4
特征值 Eigenvalues:	0.135	0.089	0.064	0.039
种类环境相关性 Species-environment correlations	0.827	0.754	0.589	0.558
累积变量百分比 Cumulative percentage variance				
种类数据 Species data:	13.5	22.4	28.9	32.7
种类环境相关 Species-environment relation:	38.5	63.8	82.1	93.1
总特征值 Sum of all eigenvalues	1			
所有典范特征值 Sum of all canonical eigenvalues	0.352			

表 3 RDA 前 2 轴与环境因子之间相关系数

Table 3 Correlations between various environmental factors and the first two axis of RDA

项目 Item	SPEC AX1	SPEC AX2	ENVI AX1	ENVI AX2
SPEC AX1	1			
SPEC AX2	-0.1232	1		
ENVI AX1	0.7304 **	0	1	
ENVI AX2	0	0.7329 **	0	1
水温 Water temperature	-0.2962 **	0.419 **	-0.4056 **	0.5717 **
溶解氧 Dissolved oxygen	0.355 **	0.1566	0.486 **	0.2136 *
盐度 Salinity	0.4605 **	0.2388 *	0.6305 **	0.3258 **
pH	-0.4532 **	-0.1106	-0.6205 **	-0.1509
透明度 Transparency	0.2331 *	0.0684	0.3191 **	0.0933
总氮 Total nitrogen	0.4099 **	0.2529 *	0.5612 **	0.345 **
总磷 Total phosphorus	0.05	0.0675	0.0685	0.0921
叶绿素 a Chlorophyll a	-0.0109	0.6718 **	-0.0149	0.9167 **

* : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$; SPEC AX1: 物种排序轴 1 Species axis 1; SPEC AX2: 物种排序轴 2 Species axis 2; ENVI AX1: 环境因子排序轴 1

Environmental factors axis 1; ENVI AX2: 环境因子排序轴 2 Environmental factors axis 2

4 月份发生绿藻门拟菱形弓形藻水华,硅藻门梅尼小环藻是全年大多数月份的优势种。小球藻和假鱼腥藻属作为优势种,经常出现在养殖池塘、水库、湖泊等相对封闭静止水体中^[26-29],在河流中出现仅有个别报道^[30],可能是由于调查河涌水体富营养化严重所致。

浮游植物细胞丰度呈现单峰型,调查区域处于亚热带地区,冬季水温较低不利于浮游植物繁殖,进入春季气温迅速回升,降雨增多,上游带来大量藻种和营养盐,适宜的水温促使浮游植物迅速繁殖爆发,从而形成水华,达到峰值。不同门类的藻类对环境的适应性是不同的,当周围生存环境发生变化时,能适应该生存条件的种类迅速繁殖,成为优势类群。PEG 模型中浮游植物群落季节演替大概过程是:从冬春季的隐藻和硅藻转变为夏季的绿藻,到夏末秋初则以蓝藻占优势;随着秋季的到来,硅藻的重要性再次上升^[31]。本研究基本符合 PEG 模型,冬季硅藻占优势,春夏季绿藻占优势,秋季蓝藻占优势。由于夏季时间长,春秋季节时间短,绿藻占优势时间久,主导着浮游植物细胞丰度的变化。相关性分析也表明,绿藻门细胞丰度增加可以促使细胞丰度大量增加,而硅藻门和蓝藻门细胞丰度增幅较小。

3.2 浮游植物群落聚类分析

浮游植物时间聚类分析表现出相邻月份浮游植物群落相似性较高的现象。2015 年 3 月和 4 月调查区域发生拟菱形弓形藻水华,水华种占绝对优势,主导着浮游植物群落结构的组成,导致两个月浮游植物群落结构相似。2015 年 5 月至 9 月,浮游植物群落结构相似,以梅尼小环藻、小球藻和假鱼腥藻为主要优势种,调查区域浮游植物细胞丰度平均值为 1.33×10^6 个/L,且水温都在 20 ℃ 以上(图 2),处于波峰位置,适合浮游植物生长。2015 年 11 月至 2016 年 2 月,浮游植物优势种类相似,可能是由于温度较低,导致浮游植物细胞丰度低,

平均值仅为 0.49×10^6 个/L, 从而出现四个月浮游植物群落结构相似的现象。有研究报道, 水温是影响浮游植物种类组成及多样性的关键因子, 随着水温的升高, 大量浮游植物得以快速生长和繁殖, 水温降到浮游植物的最适温度以下时, 浮游植物的生长逐渐减缓直至停止生长^[32]。

由于各采样点所处的地理位置和生境不同, 因此各样点中浮游植物的种类数、组成以及细胞密度表现出一定的空间差异。有研究认为人类活动对浮游植物的数量分布特征和群落结构有重要影响^[33]。浮游植物空间聚类表明, 站点 S14 和 S19 浮游植物群落结构相似, 两站点受人为活动影响尤为严重, 站点 14 紧挨水产市场, 岸边停放大量渔船, 堆放大量死鱼、死虾、贝类等, 严重影响河涌水质环境, 站点 S19 为南沙渔人码头, 两站点环境较为相似。S6、S12、S16 和 S21 站点人为活动较为频繁, 与 S14 和 S19 站点有所区别, 主要受生活污水排放影响。站点 S2 和 S8 处于不同环境, 相对于其他站点受污染较小, S2 位于建筑工地旁, 且离河口最远, 周围未发现污染源, 站点 S8 虽位于小餐馆旁, 但排污口位于站点下游。其中站点 S2 与 S14 浮游植物群落相似性最低, 可能是由于水环境有较大差别。调查区域穿过城市居民区且地理位置相差不远, 河涌全年呈现出富营养化状态, 浮游植物群落结构整体上有一定的相似性。

3.3 环境因子对南沙河涌浮游植物的影响

温度、营养盐、光照强度和水动力学是影响浮游植物生长的主要环境因子, 同样也影响着浮游植物的分布^[34], 其他物理、化学和生物因子也能够通过特定的方式和过程影响水温和营养盐, 从而进一步影响浮游植物群落在水体中的分布^[35]。

RDA 分析中, 与轴 1 呈显著相关性的是温度、溶氧、盐度和 pH, 影响着轴 1 方向的物种变化; 与轴 2 呈显著相关性是温度和叶绿素 a, 主导着轴 2 方向上的物种变化(图 6)。梅尼小环藻、巨颤藻、假鱼腥藻、膨胀色球藻和四足十字藻与水温呈正相关, 其密度受水温影响较大。研究发现, 假鱼腥藻与水温呈正相关, 一般在夏秋季大量出现^[36]。梅尼小环藻、变异直链藻和颗粒直链藻极狭变种与 pH 呈显著相关性, 研究地区 pH 范围为 6.63—8.50, 均值为 7.94, 水体呈现碱性(图 2), 有研究报道, 硅藻门浮游植物受 pH 影响较大, 直链藻适合碱性环境生长^[37], 与本研究结果一致(图 6)。透明度和水温成为影响浮游植物功能群分布的关键因子^[38]。透明度会直接影响浮游植物和其他水生生物的生存, 随着透明度的增加, 丰度和生物量逐渐减小^[39]。水温与所选多数浮游植物呈正相关, 浮游植物的生长需要在一定的光照和温度下进行, 温度也是影响浮游植物生长最直接的环境因子, 不同种类的浮游植物适宜生长的温度不同。对 Mahanadi 江浮游植物的研究表明, 对种群影响最大的环境因子是水温, 浮游植物种类数与温度和光照强度有直接关系^[40]。河口盐度对浮游植物分布有重要影响, 是影响黄河口浮游植物空间变化的关键环境因子, 甲藻、蓝藻与绿藻群落受盐度变化的影响程度明显大于硅藻群落^[41]。拟菱形弓形藻与盐度和总氮呈显著正相关, 与温度呈正相关, 表明盐度、温度和总氮可能是其形成水华的关键因子。总氮、总磷的增加促进拟菱形弓形藻迅速生长, 同时拟菱形弓形藻大量增殖大大增加了水体中总氮和总磷的含量。叶绿素 a 与所选绝大多数浮游植物均呈现正相关, 表明所选浮游植物能

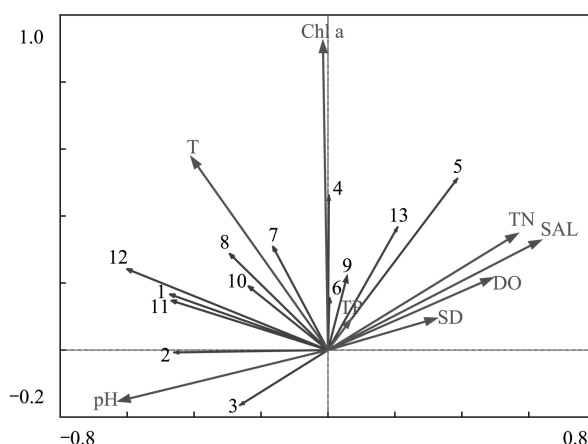


图 6 浮游植物与环境因子 RDA 分析图

Fig. 6 RDA ordination diagram shown relationships between phytoplankton and environmental factors

1. 梅尼小环藻 *C. meneghiniana*, 2. 变异直链藻 *M. varians*, 3. 颗粒直链藻极狭变种 *M. granulate var. angustissima*, 4. 二形栅藻 *S. dimorphus*, 5. 拟菱形弓形藻 *S. nitzschoides*, 6. 四尾栅藻 *S. quadricauda*, 7. 四足十字藻 *C. tetrapedia*, 8. 小球藻 *C. vulgaris*, 9. 衣藻属 *Chlamydomonas* sp., 10. 假鱼腥藻属 *Pseudanabaena* sp., 11. 巨颤藻 *O. princeps*, 12. 膨胀色球藻 *C. turgidus*, 13. 绿色裸藻 *Euglena viridis*, 叶绿素 a: chlorophyll a, 盐度: salinity, 溶氧: dissolved oxygen, 水温: water temperature, 总氮: total nitrogen, 总磷: total phosphorus, 透明度: transparency

较好反映南沙河涌浮游植物群落变化。

4 结论

(1) 珠江口广州南沙河涌全年调查期间观察到浮游植物共计 164 种(属), 隶属于 7 门 73 属, 主要是绿藻、硅藻和蓝藻三个门类, 属于绿藻-硅藻水体; 梅尼小环藻、假鱼腥藻属和小球藻作为优势种出现最多, 12 次调查中出现 9 次; 浮游植物密度最高出现在 2015 年 4 月, 14 涌密度高达 101.34×10^6 个/L, 发生拟菱形弓形藻水华, 2016 年 2 月份最低, 可能是水温较低的原因; 浮游植物群落的时间演替基本符合 PEG 模型, 从冬季的硅藻, 到春夏季的绿藻, 再到秋季的蓝藻; 相关性分析表明绿藻细胞丰度变化主导着浮游植物总丰度的变化。

(2) 聚类分析表明, 浮游植物时间聚类分析表现出相邻月份浮游植物群落相似性较高的现象, 可分为 3 类, 水温是关键因子; 空间聚类分析显示, 人为活动对浮游植物的数量分布特征和群落结构有重要影响。

(3) 冗余分析显示, 叶绿素 a、溶解氧、盐度、水温、总氮和 pH 与浮游植物群落结构关系最为密切。春季水华形成的关键因子是盐度、温度和总氮。

致谢: 罗洪添、梁迪文、武宇辉、龙艾虹和张依帮助采样和水质测定, 刘之威和陆欣鑫帮助鉴定和数据分析。特此致谢。

参考文献 (References):

- [1] 郭沛涌, 沈焕庭. 河口浮游植物生态学研究进展. 应用生态学报, 2003, 14(1): 139-142.
- [2] Lopes C B, Lillebø A I, Dias J M, Pereira E, Vale C, Duarte A C. Nutrient dynamics and seasonal succession of phytoplankton assemblages in a Southern European Estuary: Ria de Aveiro, Portugal. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007(3/4), 71: 480-490.
- [3] Litchman E, Klausmeier C A, Schofield O M, Falkowski P G. The role of functional traits and trade-offs in structuring phytoplankton communities: scaling from cellular to ecosystem level. Ecology Letters, 2007, 10(12): 1170-1181.
- [4] Tao X. Phytoplankton biodiversity survey and environmental evaluation in Jia Lize wetlands in Kunming City. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10: 2336-2341.
- [5] Verasztó C S, Kiss K T, Sipkay C S, Gimesi L, Vadadi-Fülöp C S, Türei D, Hufnagel L. Long-term dynamic patterns and diversity of phytoplankton communities in a large eutrophic river (the case of River Danube, Hungary). Applied Ecology and Environmental Research, 2010, 8(4): 329-349.
- [6] 江源, 王博, 杨浩春, 刘全儒, 周云龙. 东江干流浮游植物群落结构特征及与水质的关系. 生态环境学报, 2011, 20(11): 1700-1705.
- [7] 张俊逸, 蒋江峦, 刘擎, 龚映雪, 王庆, 杨宇峰. 珠江广州段微生物和浮游植物群落与水质特征研究. 水生态学杂志, 2011, 32(2): 38-46.
- [8] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006.
- [9] 曾呈奎, 毕列爵. 藻类名词及名称(第二版). 北京: 科学出版社, 2005.
- [10] 翁建中, 徐恒省. 中国常见淡水浮游藻类图谱. 上海: 上海科技出版社, 2010.
- [11] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [13] Spatharis S, Roelke D L, Dimitrakopoulos P G, Kokkoris G D. Analyzing the (mis) behavior of Shannon index in eutrophication studies using field and simulated phytoplankton assemblages. Ecological Indicators, 2011, 11(2): 697-703.
- [14] Danilov R, Ekelund N G A. The efficiency of seven diversity and one similarity indices based on phytoplankton data for assessing the level of eutrophication in lakes in central Sweden. Science of the Total Environment, 1999, 234(1/3): 15-23.
- [15] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准. 中国环境监测, 2002, 18(5): 47-49.
- [16] 易齐涛, 陈求稳, 赵德慧, 徐鑫. 淮南采煤塌陷湖泊浮游植物功能群的季节演替及其驱动因子. 生态学报, 2016, 36(15): 4843-4854.
- [17] 洪松, 陈静生. 中国河流水生生物群落结构特征探讨. 水生生物学报, 2002, 26(3): 295-305.
- [18] Hamilton P B, Lavoie I, Ley L M, Poulin M. Factors contributing to the spatial and temporal variability of phytoplankton communities in the Rideau River (Ontario, Canada). River Systems, 2011, 19(3): 189-205.
- [19] 宋贤英, 张捷, 白春节, 周蓉蓉, 刘伟, 徐石林, 谭大鹏, 黄平沙. 甬江干流浮游植物的群落结构及其季节变化. 应用与环境生物学报, 2013, 19(4): 663-669.

- [20] 王超, 赖子尼, 李新辉, 高原, 李跃飞, 余煜棉. 西江下游浮游植物群落周年变化模式. 生态学报, 2013, 33(14): 4398-4408.
- [21] 林施泉, 邵晓阳, 姜丹, 刘成士. 福建省木兰溪流域浮游植物群落结构特征. 湿地科学, 2013, 11(1): 48-53.
- [22] 雷光英, 杨宇峰, 王庆, 胡韧, 王朝晖. 珠江广州河段水质和浮游植物群落特征. 暨南大学学报: 自然科学版, 2007, 28(3): 302-307.
- [23] 王超, 李新辉, 赖子尼, 曾艳艺, 高原, 刘乾甫, 杨婉玲. 珠三角河网浮游植物生物量的时空特征. 生态学报, 2013, 33(18): 5835-5847.
- [24] 刘健康. 高级水生生物学. 北京: 科学出版社, 1999.
- [25] Lakshminarayana J S S. Studies on the phytoplankton of the River Ganges, Varanasi, India, Part II "The seasonal growth and succession of the plankton algae in the River Ganges". Hydrobiologia, 1965, 25(1/2): 138-165.
- [26] 刘孝竹, 李卓佳, 曹煜成, 文国樑. 低盐度养殖池塘常见浮游微藻的种类组成、数量及优势种群变动. 南方水产, 2009, 5(1): 9-16.
- [27] 孙育平, 王晓辉, 胡韧, 韩博平. 南亚热带高产渔业水库——显岗水库敞水区浮游植物群落结构的季节变化特征. 应用与环境生物学报, 2010, 16(2): 228-234.
- [28] 黄志敏, 陈椽, 刘之威, 龙胜兴. 贵州百花湖夏季浮游植物昼夜垂直分布特征. 生态学报, 2014, 34(19): 5389-5397.
- [29] 徐凤洁, 俞秋佳, 王昊彬, 谭渝峰, 由文辉. 淀山湖夏秋季浮游植物优势种生态特征分析. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2014, (6): 90-100, 120.
- [30] 张萍, 刘宪斌, 李宝华, 白明, 李彤, 王娟娟. 海河干流浮游植物群落结构特征研究. 淡水渔业, 2015, 45(4): 41-48.
- [31] Sommer U, Gliwicz Z M, Lampert W, Duncan A. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in freshwaters. Archiv für Hydrobiologie, 1986, 106(4): 433-471.
- [32] 俞秋佳, 徐凤洁, 蒋跃, 王昊彬, 余华光, 由文辉. 夏秋季苏州河浮游植物群落特征及其影响因子. 生态与农村环境学报, 2014, 30(4): 450-457.
- [33] 孙翠慈, 王友绍, 孙松, 张凤琴. 大亚湾浮游植物群落特征. 生态学报, 2006, 26(12): 3948-3958.
- [34] Xiao L J, Wang T, Hu R, Han B P, Wang S, Qian X, Padisák J. Succession of phytoplankton functional groups regulated by monsoonal hydrology in a large canyon-shaped reservoir. Water Research, 2011, 45(16): 5009-5019.
- [35] Muhid P, Davis T W, Bunn S E, Burford M A. Effects of inorganic nutrients in recycled water on freshwater phytoplankton biomass and composition. Water Research, 2012, 47(1): 384-394.
- [36] 朱梦灵, 潘晓洁, 郑志伟, 邹曦, 胡莲, 张志永, 万成炎. 汉丰湖支流浮游植物群落结构及环境因子影响分析. 水生态学杂志, 2014, 35(6): 46-52.
- [37] 李慧, 刘妍, 范亚文, 国超旋. 三江平原湿地同江地区水域夏季浮游植物群落结构特征. 植物学报, 2014, 49(4): 440-449.
- [38] 熊莲, 刘冬燕, 王俊莉, 吴明珠, 李东京. 安徽太平湖浮游植物群落结构. 湖泊科学, 2016, 28(5): 1066-1077.
- [39] 李磊, 李秋华, 焦树林, 李钊, 肖晶, 邓龙, 孙荣国, 高永春, 骆兰. 小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应. 环境科学, 2015, 36(12): 4436-4443.
- [40] Arhonditsis G B, Winder M, Brett M T, Schindler D E. Patterns and mechanisms of phytoplankton variability in Lake Washington (USA). Water Research, 2004, 38(18): 4013-4027.
- [41] 苏芝娟, 王玉珏, 董志军, 张义文, 刘东艳, 王艳霞. 调水调沙后黄河河口邻近海域浮游植物群落响应特征. 海洋学报, 2015, 37(4): 62-71.