

DOI: 10.5846/stxb201808021648

贾慧娟, 赖子尼, 王超. 珠三角河网浮游植物物种丰富度时空特征. 生态学报, 2019, 39(11): 3816-3827.

Jia H J, Lai Z N, Wang C. Temporal and spatial patterns of phytoplankton species richness in the Pearl River Delta. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(11): 3816-3827.

珠三角河网浮游植物物种丰富度时空特征

贾慧娟^{1,2}, 赖子尼¹, 王超^{1,*}

1 中国水产科学研究院珠江水产研究所, 广州 510380

2 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306

摘要:对 2012 年珠三角河网浮游植物物种丰富度的时空特征进行了系统阐释。季节上, 枯水期的物种丰度差异大, 丰水期差异小; 空间上, 广州周边及河网中部个别站点的总种数高于其他站点。不同季节的空间特征显示, 枯水期的物种丰度自西江沿线、河网中部、广州周边呈递增趋势; 而丰水期呈现三角洲两侧的物种丰富度高于河网中部。各类群相对组成结果显示, 硅藻在枯水季节占绝对优势, 丰水期优势下降; 空间上广州周边站点硅藻百分比明显低于其他站点。分析原因, 径流相关的补充和稀释作用和水体搅动引起的底层藻类的悬浮补充不仅影响物种丰富度的季节变动, 也影响不同类群的相对组成; 水体交换能力和营养盐分别是决定丰水期和枯水期物种丰富度空间分布的关键因素。

关键词:珠三角河网; 浮游植物; 物种丰富度; 时空特征

Temporal and spatial patterns of phytoplankton species richness in the Pearl River Delta

JIA Huijuan^{1,2}, LAI Zini¹, WANG Chao^{1,*}

1 Pearl River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Guangzhou 510380, China

2 College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: The Pearl River Delta is the most economically active and densely populated region in South China. The production of domestic and industrial waste has increased considerably because of this economic development, and a 10% increase in waste production is estimated to have occurred in the past few years. The spatio-temporal patterns of phytoplankton species richness of the Pearl River Delta in 2012 were demonstrated in this study, based on data from 13 representative sampling sites covering most of the area of the river delta. During the investigation, 383 species from 7 groups were identified. The main groups were diatoms (Bacillariophyceae) and chlorophytes, accounting for 41.78% and 29.24% of the total numbers, respectively. Euglenophyta and Cyanobacteria were subsidiary groups. Physical and chemical variables were analyzed to assess key factors and their interaction mechanisms were demonstrated using redundancy analysis. The total species richness was significantly different among the stations in dry seasons, but not in wet seasons. In dry seasons, river water disturbance caused the suspension of diatoms. In wet seasons, exogenous supplementation occurred and the river became diluted, thereby causing a reduction in diatoms. The total species richness of the stations around Guangzhou and of several stations around the middle of the delta was higher than that of the other stations, which was mainly related to the spatial pattern of nutrient levels and the water exchange capacity. The spatial characteristics of different seasons showed that the species richness in dry seasons increased along the West River, the middle of the delta, and the area surrounding

基金项目:广州市科技计划项目(201707010310); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助(2018SJ-ZH01, 2016RC-LX01)

收稿日期:2018-08-02; **网络出版日期:**2019-03-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chaowang80@163.com

Guangzhou, indicating that nutrient contents were the most important factor. In contrast, in the wet seasons, the species richness on both sides of the delta was higher than that in the middle of the delta. This was influenced by water flow replenishment and water exchange capacity. Moreover, the proportional composition of various groups showed that diatoms accounted for the highest proportion of total phytoplankton species in the dry season, decreasing in the wet season. The proportion of diatoms decreased during floods, owing to the supplementation of chlorophytes, euglenophytes, and cyanobacteria through influx into the main river channel from dead zones. The percentage of diatoms in the Guangzhou station was significantly lower than that of the other stations. This was primarily because the Guangzhou station was located at the intersection of rivers, and there was algal supplementation by external rivers all year round, and secondly because the Guangzhou station was located in the center of the city. These areas have large water discharges, resulting in higher nutrient contents than other areas. On the basis of statistical analysis, we concluded that neutralization of exogenous supplementation and dilution of the river and the suspension of diatoms caused by river agitation not only affected the seasonal variations of species richness, but also the relative composition of different groups. The water exchange capacity and nutrient contents were the key factors determining the spatial distribution of species richness in the wet and dry seasons, respectively.

Key Words: Pearl River delta; phytoplankton; species richness; temporal and spatial patterns

浮游植物利用光能进行光合作用合成有机物,是水域生态系统中的主要初级生产者,形成水生动物食物链的基础环节。此外,浮游植物群落的组成和变化与水理化环境特征密切相关,是水环境动态变化的敏感指示生物^[1]。目前,国内外广泛采用浮游植物作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^[2-4]。

珠江三角洲是我国华南地区经济最活跃和人口最密集的地区,三角洲上河道密布,交织成网,最后经由八个人海口流入南海。近年来随着社会经济的迅猛发展和人民生活水平的日益提高,工农业生产和生活污水排放加剧,珠三角河网水域的水质不断恶化。水利部珠江水利委员会发布的《珠江片水资源公报 2011》显示,珠三角近 1/4 河段水质为劣 V 类,在珠江水资源中水质最差。

研究小组前期对该水域浮游植物生物量^[5]、栅藻^[6]和裸藻^[7]的时空特征及成因进行了详细阐释。本文重点阐释该水域浮游植物物种丰富度的时空特征,结合前期的研究结果,深入了解该水域浮游植物多样性组成及分布特征,挖掘关联因子,为该水域生态环境评价和保护工作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 调查站位和时间

本次调查在其下游的珠三角河网水域,布设了 13 个采样站位,形成伞状布局,基本覆盖了整个河网水域,具体布置如图 1 所示,其中青岐位于西江和北江汇合点三水上西江一侧,左滩、外海和新围位于西江一线;小榄、小塘、北滘、榄核、横沥、陈村和市桥位于纵横交错的河网中部;珠江桥和莲花山属于广州周边站位,珠江桥位于广州市区内河段,莲花山位于广州市郊东江入虎门口一线。采样点定位通过 GPS 全球卫星定位系统记录。调查时间分别为 2012 年的 3 月、5 月、8 月和 12 月,其中 3 月和 12 月代表枯水期,5 月和 8 月代表丰水期,每个季度的调查均在 2 至 3 天内完成整个河网水域的采样工作。

1.2 浮游植物样本采集、处理及数据收集

浮游植物采样取表层水(水面下 0.5 m) 1 L 装入聚乙烯瓶中,立即用鲁格氏液固定,使其最终浓度为 15‰。水样运回实验室后,立即移入标记刻度 1000 mL 玻璃量筒内,加盖静置 24 h 后,用管口包裹筛绢的虹吸管或吸管小心吸去上清液。如此反复多次,直至将水样浓缩至 30—100 mL。分析时取均匀样品 1 mL 注入 Sedgewick-Rafte 浮游植物计数框中,在 Nikon TS100 倒置显微镜下进行浮游植物的种类鉴定和计数^[8-11]。

1.3 水化学样本采集、处理及理化环境数据收集

现场环境因子包括水温、盐度、pH 值和溶解氧等,使用便携式水质分析仪(YSI6600-02, USA)测定,透明

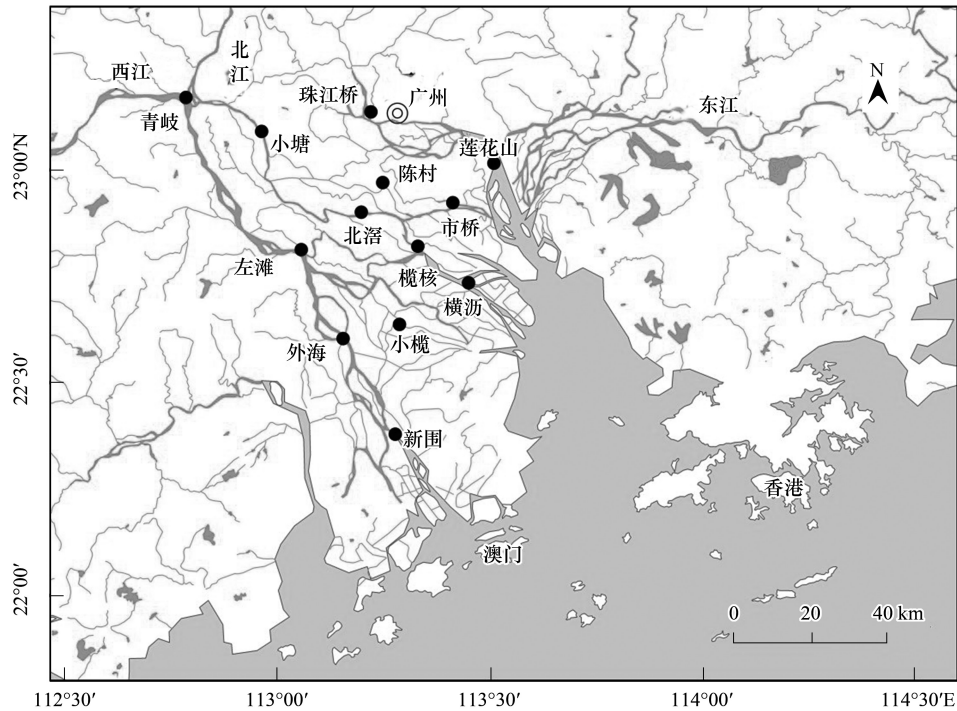


图1 调查站位布设图

Fig.1 Map of sampling sites

度数值用透明度盘测定,河宽数据用测距仪(MULTIFUNCTION LASER RANGER FINDE)测定。另取 500 mL 水样,现场过滤后置入带冰块的冷藏箱中运回实验室,用水质流动注射分析仪(SKALAR,荷兰)对高锰酸盐指数和营养盐成分包括总磷、总氮、和硅酸盐进行分析,记录数据。

1.4 数据处理与分析

浮游植物生物量的计算方法参照 Hillebrand 等^[12]通过体积法取几何近似值,分析过程中将出现频率高于 60%的物种称为常见种,将生物量在总种群中所占百分比记为优势度。

各季节和调查站位的浮游植物物种丰富度数据采用物种丰度总和。时空分布特征用 Origin 8.5 软件完成;不同类群的物种丰富度与环境因子之间关系分析用软件完成,并得到 RDA 二维降序图。

2 结果

2.1 理化数据

调查站位的理化环境特征见表 1。总体显示,广州周边站位珠江桥和莲花山为一类,河网中部站位为一类,沿西江沿线站位为一类。西江沿线站位的河宽明显高于其他站位,营养盐含量较低;河网中部站位河宽低于其他站位;广州周边站位的营养盐含量一般高于其他站位,但透明度和溶解氧明显低于其他站位,富营养化严重。

2.2 不同季节常见种的出现频率和优势度

各季节常见种的出现频率和优势度见表 2。3 月份的常见种为 22 种,其中硅藻 20 种,绿藻 2 种;5 月份的常见种为 22 种,其中硅藻 7 种,绿藻 13 种,蓝藻和裸藻各 1 种;8 月份的常见种为 30 种,其中硅藻 13 种,绿藻 12 种,蓝藻 3 种和裸藻 2 种;12 月份常见种为 22 种,其中硅藻 10 种,绿藻 12 种。硅藻中的颗粒沟链藻为全年常见种(3、5 和 8 月份的出现频率均为 100%,12 月份的出现频率为 92.31%),也是最优势种(最高优势度达 42.96%)。绿藻中的被甲栅藻虽然出现率也很高(5、8、12 月的出现频率均为 100%),但是在 3 月份不是常见种,并且优势度也远远低于颗粒沟链藻。

表 1 调查站位的理化环境特征(均值和标准偏差)
Table 1 The physical and chemical factors of the sampling sites (average and standard deviation)

站点 Station	经纬度 Longitude and latitude	水温 Water temperature/°C	河宽 River width/m	盐度 Salinity	pH	透明度 Transparency/cm	溶解氧 Dissolved oxygen/ (mg/L)	总氮 Total nitrogen/ (mg/L)	总磷 Total phosphate/ (mg/L)	硅酸盐 Silicate/ (mg/L)	高锰酸盐指数 Permanganate index/(mg/L)
青岐	112°47'11.0"E 23°10'14.5"N	20.66±6.90	280±21.57	0.15±0.06	7.89±0.52	55±20.82	6.28±1.36	3.06±0.64	0.18±0.02	3.39±0.41	4.35±1.70
左滩	113°03'26.0"E 22°48'46.6"N	22.05±8.08	1097.5±118.50	0.14±0.06	7.88±0.52	56±31.46	7.5±1.62	3.74±2.56	0.13±0.03	3.85±0.41	2.51±0.63
外海	113°09'20.3"E 22°36'14.5"N	22.19±8.49	1004±111.00	0.14±0.06	7.92±0.35	44±19.74	7.99±1.44	2.43±0.14	0.15±0.05	3.91±0.33	3.05±1.17
新围	113°16'41.5"E 22°22'45.6"N	21.4±6.99	550±51.13	0.15±0.07	7.92±0.38	53±14.43	7.35±1.94	3.69±2.39	0.2±0.09	3.95±0.51	2.56±0.94
小榄	113°17'17.9"E 22°38'13.8"N	21.6±7.65	357±32.84	0.14±0.06	7.83±0.23	54±20.56	7.31±2.03	2.54±0.51	0.12±0.03	3.78±0.36	2.96±1.70
小塘	112°57'51.1"E 23°05'27.4"N	21.29±8.10	238.5±21.02	0.12±0.06	7.87±0.43	43±29.86	6.85±1.01	3.09±0.77	0.19±0.10	4.2±0.24	3.08±0.77
北滘	113°11'54.5"E 22°54'04.1"N	21.39±7.88	616±13.96	0.13±0.06	7.75±0.51	46±27.20	7.07±2.13	4.69±3.32	0.15±0.05	4.29±0.71	3.35±1.77
榄核	113°19'53.4"E 22°49'15.2"N	21.54±7.53	175±21.57	0.13±0.07	7.88±0.40	46±24.96	6.79±1.38	2.82±0.46	0.15±0.06	4.67±0.55	2.49±0.35
横沥	113°29'02.2"E 22°44'05.4"N	21.53±6.89	299.5±15.55	0.14±0.09	7.7±0.27	48±17.08	6.92±1.69	3.18±0.18	0.16±0.06	3.54±0.40	3.71±1.66
陈村	113°14'55.7"E 22°58'15.1"N	21.44±8.59	79±6.22	0.13±0.07	7.84±0.47	48±29.86	5.99±1.13	2.76±0.45	0.16±0.05	5.02±1.57	2.88±0.40
珠江桥	113°13'16.5"E 23°08'12.6"N	22.81±8.62	316±8.16	0.31±0.20	7.49±0.44	28±6.45	0.97±0.41	7.06±0.49	0.56±0.17	5.63±1.21	6.83±1.69
莲花山	113°30'37.0"E 23°00'58.0"N	24.28±7.96	605±31.71	1.53±2.55	7.51±0.30	25±4.08	4.24±1.21	4.58±1.04	0.28±0.07	5.04±0.86	5.89±2.38
市桥	113°24'49.0"E 22°55'24.2"N	22.29±8.01	123.5±7.05	0.16±0.12	7.95±0.44	44±7.5	5.57±0.76	3±0.70	0.21±0.06	4.44±0.38	2.87±0.88

表 2 不同季节常见种的出现频率和优势度

Table 2 Frequency and dominance of common species in different seasons

时间 Time	门类 Category	种名 Species name	出现率/% Occurrence rate	优势度/% Dominance rate	
2012.3	硅藻	颗粒沟链藻 <i>Aulacoseira granulata</i>	100.00	28.36	
	硅藻	远距直链藻 <i>Melosira distans</i>	100.00	3.46	
	硅藻	变异直链藻 <i>Melosira varians</i>	100.00	22.29	
	硅藻	谷皮菱形藻 <i>Nitzschia palea</i>	100.00	0.51	
	硅藻	梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>	92.31	4.49	
	硅藻	舟形藻 <i>Navicula</i> sp.	92.31	0.55	
	硅藻	尖针杆藻极狭变种 <i>Synedra acus</i> var. <i>angustissima</i>	92.31	0.61	
	硅藻	近缘桥弯藻 <i>Cymbella affinis</i>	84.62	1.67	
	硅藻	短小楔形藻 <i>Licmophora abbreviata</i>	84.62	0.05	
	硅藻	意大利直链藻弯曲变型 <i>Melosira italica</i> var. <i>curvata</i>	84.62	4.77	
	硅藻	奇异菱形藻 <i>Nitzschia paradoxa</i>	84.62	0.75	
	硅藻	冠盘藻 <i>Stephanodiscus</i> sp.	84.62	1.01	
	硅藻	膨胀桥弯藻 <i>Cymbella tumida</i>	76.92	1.05	
	绿藻	被甲栅藻 <i>Scenedesmaceae armatus</i>	76.92	0.20	
	硅藻	卵圆双眉藻 <i>Amphora ovalis</i>	69.23	0.61	
	硅藻	颗粒沟链藻弯曲变种 <i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>curvata</i>	69.23	3.34	
	硅藻	意大利直链藻微小变种 <i>Melosira italica</i> var. <i>tenuissima</i>	69.23	4.42	
	绿藻	二形栅藻 <i>Scenedesmaceae dimorphus</i>	69.23	1.00	
	硅藻	扭曲小环藻 <i>Cyclotella comta</i>	61.54	0.12	
	硅藻	二头舟形藻 <i>Navicula dicephala</i>	61.54	0.21	
	硅藻	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>	61.54	0.21	
	硅藻	柏洛林针杆藻 <i>Synedra berolinensis</i>	61.54	0.14	
	2012.5	硅藻	颗粒沟链藻 <i>Aulacoseira granulata</i>	100.00	30.38
		绿藻	被甲栅藻 <i>Scenedesmaceae armatus</i>	100.00	3.30
		绿藻	被甲栅藻博格变种双尾变型 <i>Scenedesmus armatus</i> var. <i>bogleriensis</i> f. <i>bicaudatus</i>	100.00	1.49
		硅藻	梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>	92.31	2.46
		绿藻	直透明针形藻 <i>Hyaloraphidium rectum</i>	92.31	0.22
		绿藻	奥波莱栅藻 <i>Scenedesmus opoliensis</i>	92.31	0.35
		硅藻	舟形藻 <i>Navicula</i> sp.	84.62	1.74
		绿藻	斜生栅藻 <i>Scenedesmus obliquus</i>	84.62	0.85
		硅藻	针杆藻 <i>Synedra</i> sp.	84.62	0.28
		绿藻	四足十字藻 <i>Crucigenia tetrapedia</i>	76.92	0.45
绿藻		网球藻 <i>Dictyosphaeria cavernosa</i>	76.92	9.12	
蓝藻		微小平裂藻 <i>Merismopedia tenuissima</i>	76.92	0.35	
绿藻		科马克单针藻 <i>Monoraphidium komarkovae</i>	76.92	0.34	
绿藻		粘四集藻 <i>Palmella mucosa</i>	76.92	0.41	
绿藻		二形栅藻 <i>Scenedesmus dimorphus</i>	76.92	0.64	
硅藻		尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>	76.92	0.21	
绿藻		集星藻 <i>Actinastrum hantzschii</i>	69.23	0.27	
绿藻		顶锥十字藻 <i>Crucigenia apiculata</i>	69.23	0.47	
硅藻		小舟形藻 <i>Navicula subminuscula</i>	69.23	0.12	
绿藻		窗格十字藻 <i>Crucigenia fenestrata</i>	61.54	0.28	
硅藻		扭曲小环藻 <i>Cyclotella comta</i>	61.54	0.32	
裸藻		圆柱形裸藻 <i>Euglena cylindrica</i>	61.54	2.29	

续表

时间 Time	门类 Category	种名 Species name	出现率/% Occurrence rate	优势度/% Dominance rate	
2012.8	硅藻	颗粒沟链藻 <i>Aulacoseira granulata</i>	100.00	42.96	
	硅藻	梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>	100.00	3.24	
	绿藻	粘四集藻 <i>Palmella mucosa</i>	100.00	0.74	
	绿藻	被甲栅藻 <i>Scenedesmus armatus</i>	100.00	1.69	
	绿藻	被甲栅藻博格变种双尾变型 <i>Scenedesmus armatus</i> var. <i>boglariensis</i> f. <i>bicaudatus</i>	100.00	0.58	
	硅藻	柏洛林针杆藻 <i>Synedra berolinensis</i>	100.00	3.88	
	蓝藻	微小平裂藻 <i>Merismopedia tenuissima</i>	92.31	0.55	
	硅藻	舟形藻 <i>Navicula</i> sp.	92.31	0.81	
	蓝藻	绿色颤藻 <i>Oscillatoria chlorina</i>	92.31	0.33	
	绿藻	二形栅藻 <i>Scenedesmus dimorphus</i>	92.31	0.42	
	硅藻	平片针杆藻 <i>Synedra tabulata</i>	92.31	2.26	
	硅藻	颗粒直链藻极狭变种 <i>A. granulata</i> var. <i>angustissima</i>	84.62	2.08	
	硅藻	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>	84.62	0.28	
	绿藻	四足十字藻 <i>Crucigenia tetrapedia</i>	76.92	0.17	
	硅藻	扭曲小环藻 <i>Cyclotella comta</i>	76.92	0.48	
	绿藻	集星藻 <i>Actinastrum hantzschii</i>	69.23	0.19	
	裸藻	圆柱形裸藻 <i>Euglena cylindrica</i>	69.23	0.94	
	硅藻	意大利直链藻微小变种 <i>Melosira italica</i> var. <i>menuissima</i>	69.23	0.71	
	硅藻	变异直链藻 <i>Melosira varians</i>	69.23	3.16	
	绿藻	科马克单针藻 <i>Monoraphidium komarkovae</i>	69.23	0.10	
	硅藻	新月菱形藻 <i>Nitzschia closterium</i>	69.23	0.11	
	硅藻	谷皮菱形藻 <i>Nitzschia palea</i>	69.23	0.17	
	绿藻	斜生栅藻 <i>Scenedesmus obliquus</i>	69.23	0.19	
	绿藻	奥波莱栅藻 <i>Scenedesmus opoliensis</i>	69.23	0.09	
	绿藻	华丽四星藻 <i>Tetrastrum elegans</i>	69.23	0.07	
	硅藻	颗粒沟链藻弯曲变种 <i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>curvata</i>	61.54	1.47	
	绿藻	顶锥十字藻 <i>Crucigenia apiculata</i>	61.54	0.22	
	裸藻	纤细裸藻 <i>Euglena gracilis</i>	61.54	0.89	
	绿藻	微芒藻 <i>Micractinium pusillum</i>	61.54	0.23	
	蓝藻	断裂颤藻 <i>Oscillatoria fraga</i>	61.54	0.18	
	2012.12	硅藻	梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>	100.00	3.39
		硅藻	远距直链藻高山变种 <i>Melosira distans</i> var. <i>alpigena</i>	100.00	5.31
		硅藻	舟形藻 <i>Navicula</i> sp.	100.00	1.22
		绿藻	被甲栅藻 <i>Scenedesmus armatus</i>	100.00	0.97
		硅藻	颗粒沟链藻 <i>Aulacoseira granulata</i>	92.31	33.95
		硅藻	意大利直链藻微小变种 <i>Melosira italica</i> var. <i>menuissima</i>	92.31	16.36
绿藻		被甲栅藻博格变种双尾变型 <i>Scenedesmus armatus</i> var. <i>boglariensis</i> f. <i>bicaudatus</i>	92.31	0.41	
绿藻		二形栅藻 <i>Scenedesmus dimorphus</i>	92.31	0.30	
硅藻		柏洛林针杆藻 <i>Synedra berolinensis</i>	92.31	0.57	
绿藻		四足十字藻 <i>Crucigenia tetrapedia</i>	84.62	0.54	
绿藻		直透明针形藻 <i>Hyaloraphidium rectum</i>	84.62	0.18	
绿藻		华丽四星藻 <i>Tetrastrum elegans</i>	84.62	0.11	
硅藻		颗粒直链藻极狭变种 <i>A. granulata</i> var. <i>angustissima</i>	76.92	2.10	
绿藻		粘四集藻 <i>Palmella mucosa</i>	76.92	0.42	
硅藻		谷皮菱形藻 <i>Nitzschia palea</i>	69.23	0.25	

续表

时间 Time	门类 Category	种名 Species name	出现率/% Occurrence rate	优势度/% Dominance rate
	硅藻	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>	69.23	0.08
	绿藻	镰形纤维藻 <i>Ankistrodesmus falcatus</i>	61.54	0.05
	绿藻	直角十字藻 <i>Crucigenia rectangularis</i>	61.54	0.17
	硅藻	扭曲小环藻 <i>Cyclotella comta</i>	61.54	0.28
	绿藻	二角盘星藻具孔变种 <i>Pediastrum duplex</i> var. <i>duodenarium</i>	61.54	0.82
	绿藻	尖细栅藻 <i>Scenedesmus acuminatus</i>	61.54	0.10
	绿藻	矮型顶接鼓藻 <i>Spondylosium pygmaeum</i>	61.54	0.85

2.3 物种组成

通过对珠三角河网 13 个采样点为期一年的取样检测,共采集样本 52 个,鉴定浮游植物 383 种。其中硅藻种类数达 160 种,占浮游植物物种丰度的 41.78%;绿藻种类数达 112 种,占浮游植物物种丰度的 29.24%;蓝藻为 20 种,占总物种丰度的 5.22%;裸藻种类数达 84 种,占总种类的 21.93%;其他藻类种类为 7 种。

2.4 浮游植物总物种丰富度的时空特征

根据珠三角河网浮游植物总物种丰富度的时间变化(图 2)可知:调查期间,浮游植物的总物种丰富度的时间变化模式呈现出丰水季节差异小,枯水季节差异较大的特征。总物种丰度的最大值出现在 3 月份,为 229 种;其次为 5 月份的 200 种,与 8 月份的 198 种持平;最小值为 12 月份的 167 种。浮游植物各类群的相对百分组成(图 2)显示,硅藻和绿藻为主要类群,所占百分比之和一般不低于 70%;从两者的相对组成来看,3 月份硅藻的优势度极为明显;其他季节差异不大。

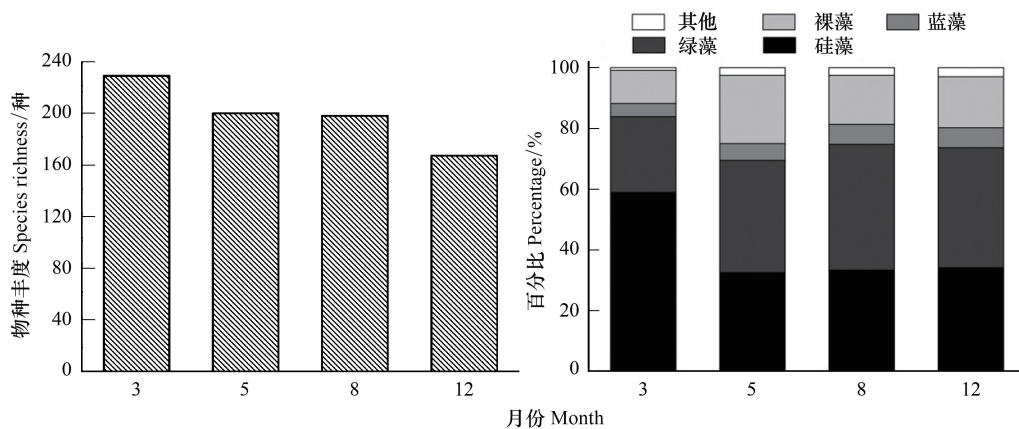


图 2 浮游植物总物种丰富度的时间特征

Fig.2 Time characteristics of total species richness of phytoplankton

根据浮游植物总物种丰富度的空间分布特征(图 3)显示:广州周边站位及河网中部个别站位的总物种丰富度偏高,河网中部其他站位偏低。总物种丰度的最大值出现在珠江桥,为 154 种;次高值出现在北滘和市桥,均为 152 种;最低值出现在小榄,为 94 种;次低值出现在陈村,为 105 种。

各类群相对百分组成的结果(图 3)显示:硅藻和绿藻为主要类群,所占百分比之和不低于 70%。尽管河网中部个别站位(北滘)的总物种丰富度与广州周边站位持平,但是相对百分组成存在明显差异。广州周边站位的硅藻百分比明显低于绿藻,而其他站位均呈现硅藻优于绿藻或持平状态。

根据不同季节浮游植物物种丰富度的空间分布特征(图 4)表明:不同季节的物种丰富度的空间分布格局呈现特有的规律。丰水期,河网两侧站位的物种丰富度高于河网中部站位(个别站位除外),最大值出现在广州周边站位,最小值出现在河网中部站位。枯水期,基本呈现沿西江、河网中部、广州周边站位递增的趋势,最

大值出现在河网中部或广州周边站位,最小值出现在西江沿线站位。

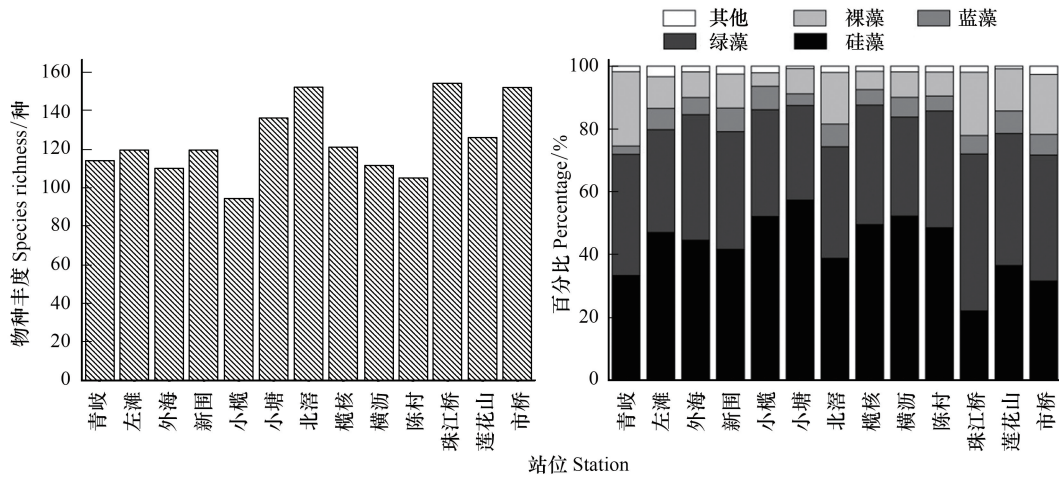


图 3 浮游植物总物种丰富度的空间特征

Fig.3 Spatial characteristics of total species richness of phytoplankton

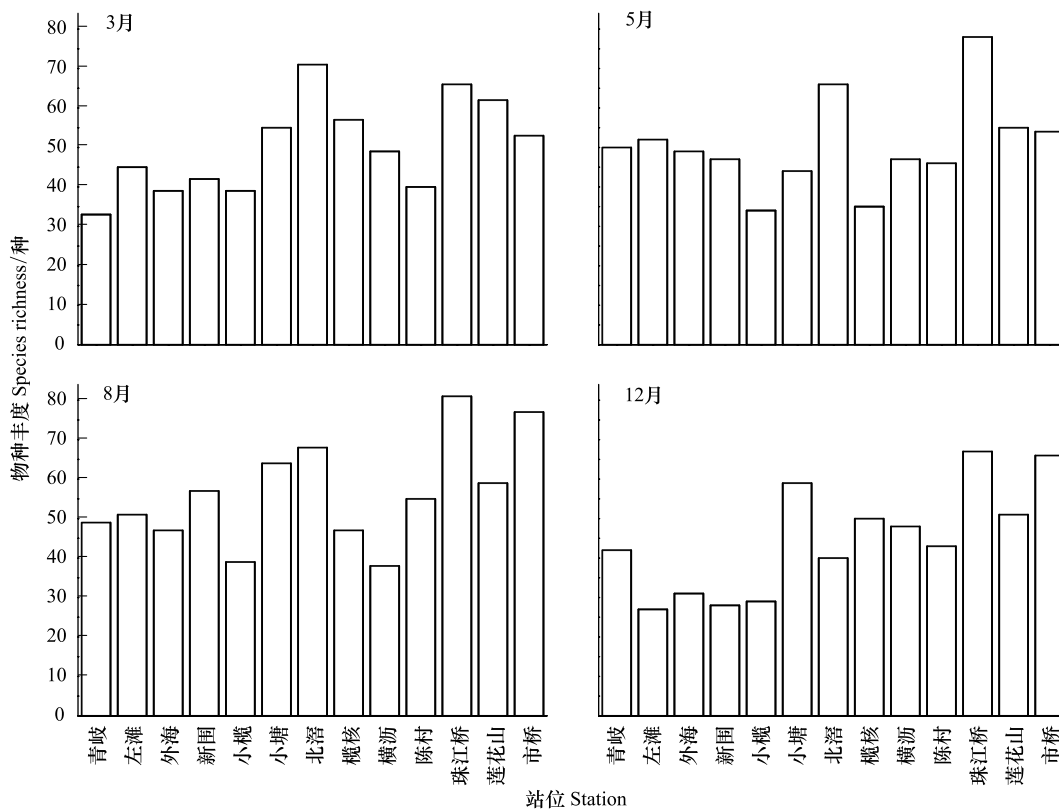


图 4 不同季节浮游植物物种丰富度的空间分布特征

Fig.4 Spatial distribution characteristics of species richness of phytoplankton in different seasons

由图 5 可知,各类群的相对组成的时空特征差异显著。季节特征显示,枯水期硅藻的百分比高于丰水期,3 月份尤其明显,硅藻百分比均值为 69.72%。空间特征显示,广州周边站位的硅藻百分比一般低于其他站位,极少高于 40%。

2.5 相关分析

用 R 软件对 5 个浮游植物类群(硅藻、绿藻、蓝藻、裸藻和其他)的物种丰度及总种数与环境因子数据的

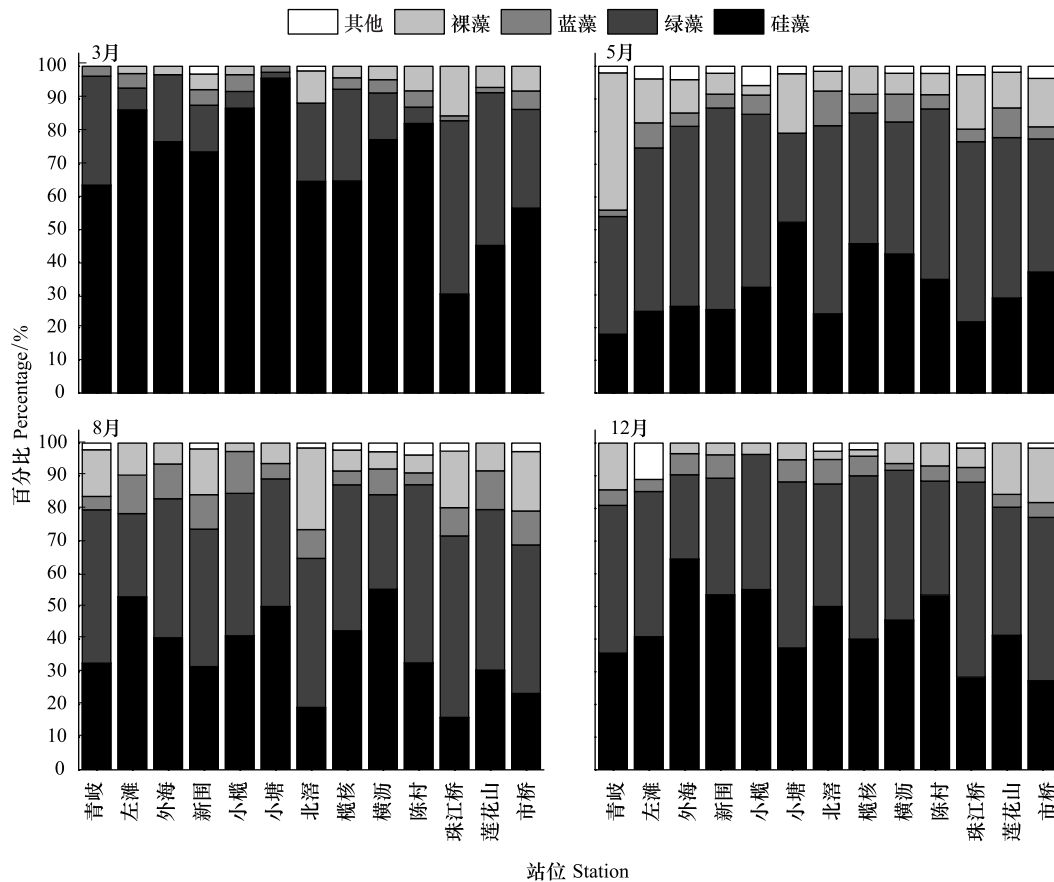


图5 各类群的相对百分比的时空特征

Fig.5 Temporal and spatial characteristics of relative percentages of various groups

关系进行冗余度(RDA)分析。方差分析检验(ANOVA test)结果显示,轴1($P=0.001$)和轴2($P=0.001$)对关联性的影响显著($R^2=0.52$),二维降序图如图6所示。轴1和轴2的特征值分别为0.693和0.108,分别可解释所有环境因子影响的78.48%和12.25%。基于轴1的关联性结果显示,硅藻与其他不同类群分布在轴1的相反方向,硅藻与溶解氧存在一定的正相关关系,与水温及营养盐存在一定的负相关关系;其他不同类群与硅藻恰恰相反。基于轴2的关联性结果显示,硅藻与总种数分布在轴2的同一侧。硅藻与硅酸盐存在一定的正相关关系,与透明度存在一定的负相关关系;总种数与硅藻一致。

各类群的相对百分比与环境因子的分析图显示,轴1($P=0.001$)和轴2($P=0.001$)对关联性的影响显著($R^2=0.44$),二维降序图如图7所示。轴1和轴2的特征值分别为0.673和0.130,分别可解释所有环境因子影响的73.11%和14.10%。基于轴1的关联性结果显示,硅藻与其他不同类群分布在轴1的相反方向,硅藻与溶解氧存在一定的正相关关系,与水温及营养盐存在一定的负相关关系;其他不同类群与硅藻恰恰相反。基于轴2的关联性结果显示,裸藻与磷酸盐存在一定的正相关关系,与透明度和pH存在着一定的负相关关系。

3 讨论

研究结果显示,硅藻和绿藻是调查水域浮游植物群落组成的最主要类群,裸藻和蓝藻次之。这不仅体现在总物种丰富度的相对组成上,也体现在不同类群相对组成的时空分布特征上。这与国内外河流的浮游植物群落组成模式相符合^[13-18]。

总物种丰富度的季节特征显示,丰水期的总物种丰度差异较小,而枯水期的总物种丰度差异较大。丰水

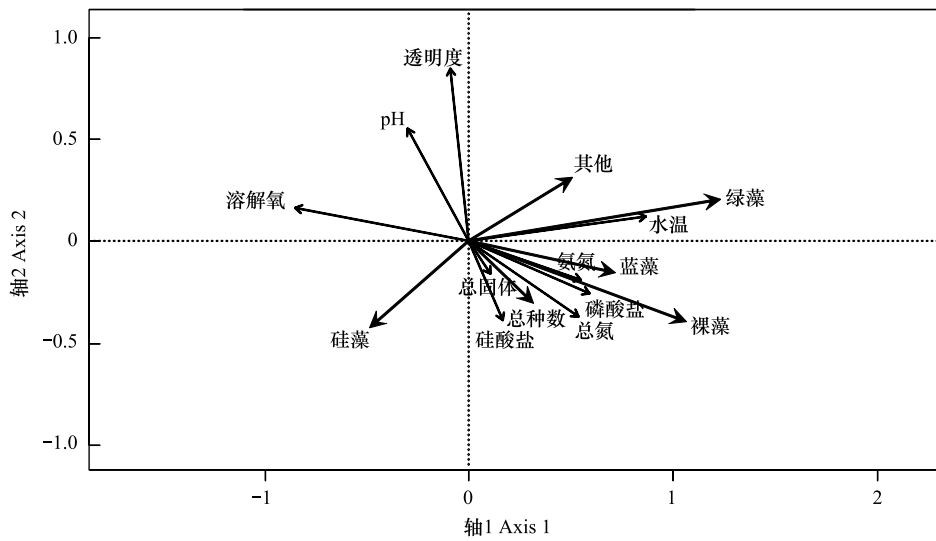


图 6 浮游植物物种丰富度与环境因子的 RDA 二维降序图

Fig.6 RDA two-dimensional descending map of the number of phytoplankton species and environmental factors

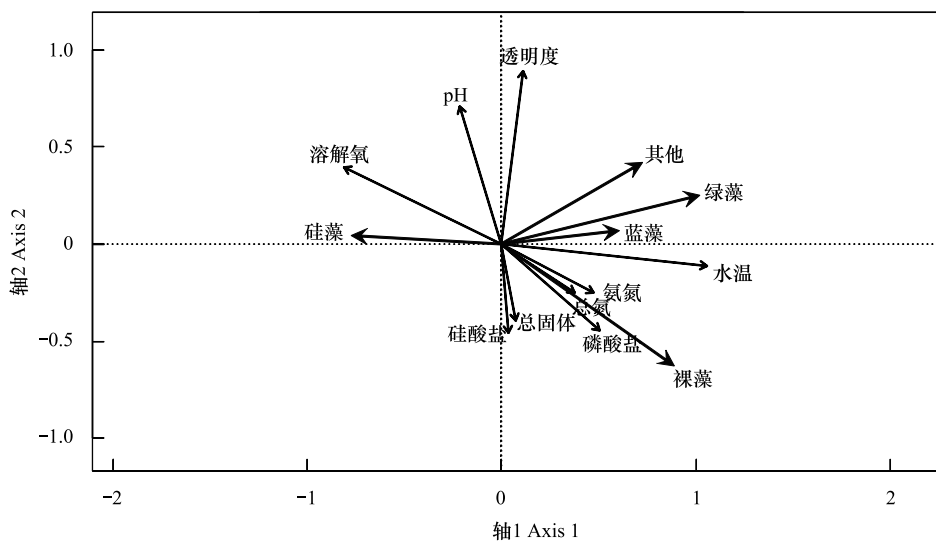


图 7 各类群相对百分比与环境因子的 RDA 二维降序图

Fig.7 RDA two-dimensional descending diagram of relative percentages of various groups and environmental factors

期期间降雨频率及降雨量均较高,因此,径流量成为丰水期物种丰富度变动的最重要影响因素^[19-23],8月份常见种的物种丰富度和多样性明显高于枯水期(表2),总种数与透明度存在一定程度的负相关也说明了这一点(图6)。参考三角洲上游西江肇庆段2009年的径流量数据,5月和8月的径流量均值分别为8694 m³/s和8019 m³/s,差异不大,这也导致丰水期总物种丰富度的差异较小。Santana等^[24]指出气候和水文变化对浮游植物结构有很大影响。Bilous等^[14]在Southern Bug河以及Sharma等^[25]在Narmada河的研究中也发现,丰水期的藻类物种丰富度差异较小。相反,枯水期由于径流小,水位较低,沿江静水水体如湖泊和水库中的蓝、绿藻的外源补充明显减少^[7,26-27],使得硅藻成为最主要类群。RDA分析结果显示,硅藻与透明度存在一定的负相关关系(图6)。原因在于,硅藻的细胞壁是硅质壳,质量重,在水体稳定的时候极易下沉。枯水期由于水位较低,加之风力、运行船舶等引起的水体搅动,有助于沉降到底层的硅藻再悬浮,补充到表层水体中,增加物种丰富度^[28-29],这应该是枯水期物种丰富度差异较大的主要原因。3月和12月的水体透明度相差20 cm,常见种组成存在明显差异(表2),且3月份硅藻物种丰富度占绝对优势,最高百分比可达96%,也印证了以上观点。

此外,3月份的总种数为全年最高,分析原因有以下两点:1)枯水期的3月份虽然没有径流增大引起的物种丰富度的外源补充,但是水体搅动造成底层硅藻的悬浮从而补充了物种丰富度,从图2中硅藻所占百分比明显高于其他类群可以看出。而12月份的透明度明显偏高,硅藻沉降,加之没有外源补充,所以物种丰度最低。2)丰水期径流量增大引起的河流外源补充,虽然增加了物种丰富度,但是对浮游植物群落也有稀释作用,因此丰水期的物种丰度是外源补充和稀释减少作用的中和结果。

总物种丰度的空间特征显示,广州周边站位及河网中部个别站位的总物种丰富度明显偏高,河网中部少数站位也呈现低于西江沿线站位的趋势。分析原因在于,1)水体营养状况是影响物种丰富度空间分布的重要因素。RDA分析结果显示,总种数与营养盐含量关系紧密,呈正相关关系。距离广州较近的珠江桥和莲花山受生产和生活污水的影响较大,营养盐含量极其丰富,明显高于其他站位(表1),导致了物种丰富度明显高于其他站位。河网中部个别站位,例如北滘,拥有两家世界500强企业,制造业发达,污染严重,水体营养盐含量高(表1),导致此类站位的物种丰富度也明显偏高。El-Karim^[30]在尼罗河水域发现,营养盐含量丰富的地区,物种丰富度偏高。2)水体交换能力是影响空间分布的另一重要因素。从河流宽度的数据(表1)可以看出,三角河网两侧站位的径流量大,水体交换能力明显优于河网中部站位,这更有利于浮游植物物种丰富度的外源补充。Bovo-Scomparin等^[31]研究发现水体交换能力强的水域浮游植物多样性高。水体交换时沿江静水水域中的绿藻、裸藻和蓝藻等会补充汇集到河流中。

不同季节的物种丰富度的空间分布模式显示,枯水期(3月和12月)的物种丰富度自西江沿线、河网中部、广州周边呈递增趋势;而丰水期(5月和8月)的物种丰富度呈现三角洲两侧(西江沿线和广州周边)站位高于河网中部站位。枯水期,河水径流导致外源补充减小,对水体的扰动作用明显减弱,营养盐成为决定空间分布模式的最重要因素。除了营养盐自身有利于藻类的生长繁殖外,富营养水体也可以减缓表层水体中微藻的沉降速度^[6,32-34]。因此,枯水期物种丰富度的空间分布与营养盐梯度呈正相关。丰水期时,降雨量的增加导致河水的径流量明显增大,沿江静水水体如湖泊、水库等的藻类汇入,同时水体搅动使已经沉降的藻类和底栖藻类重新悬浮到表层水体中,增加了物种丰富度。珠江干流的河水流经三角洲河网,分支到错综复杂的河道中。河网两侧的站位水体径流量大,水体交换能力强,有助于表层水体物种丰富度的补充和增加;河网中部站位相对闭塞,水体交换能力弱,因此物种丰富度低于三角洲两侧站位^[35-36]。

各类群的相对百分比的时空特征显著。从季节特征来看,枯水期硅藻在占绝对优势,尤其是3月份,硅藻所占百分比的均值高达70%。丰水期因径流增大引起的外源绿藻、裸藻和蓝藻的汇入导致硅藻的优势下降,5月和8月份的常见种的绿藻、裸藻和蓝藻种类明显增加(表2)可见一斑。此外,研究水域的裸藻和栅藻^[6-7]的物种丰富度在丰水季节明显高于枯水季节,也印证了上述观点。虽然枯水期12月份的绿藻、裸藻和蓝藻也占有较大优势,但是并非因径流增大引起的外源汇入,而是因为硅藻在透明度高的条件下沉降损失造成的相对弱势。从空间特征上看,广州周边站位的硅藻百分比一般低于其他站位。这是因为这些站位处于河流交汇处,常年有外源河流带来的绿藻的补充。在RDA分析结果中显示,硅藻百分比与营养盐的含量呈负相关(图7)。Komissarov等^[13]发现富营养化水域中绿藻比硅藻更占优势。Reynold等^[37]指出绿藻与富集环境相关并且对营养敏感。广州周边站位的营养盐含量明显高于其他站位(表1),因此存在一定差异。

参考文献(References):

- [1] Reavie L, Della Gatta G, Crusio K, Aranda-Orgilles B, Buckley S M, Thompson B, Lee E, Gao J, Bredemeyer A L, Helmink B A, Zavadil J, Sleckman B P, Palomero T, Ferrando A, Aifantis I. Regulation of hematopoietic stem cell differentiation by a single ubiquitin ligase-substrate complex. *Nature Immunology*, 2010, 11(3): 207-215.
- [2] 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.
- [3] Tao X. Phytoplankton biodiversity survey and environmental evaluation in Jia Lize wetlands in Kunming City. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10: 2336-2341.
- [4] Veraszó C, 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.

- [5] 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.
- [6] 王超, 李新辉, 赖子尼, 曾艳艺, 高原, 刘乾甫, 杨婉玲, LEK Sovan. 珠三角河网水域栅藻的时空分布特征. 生态学报, 2014, 34(7): 1800-1811.
- [7] 王超, 李新辉, 赖子尼, 刘乾甫. 珠三角河网裸藻的多样性特征. 生态学报, 2016, 36(18): 5657-5669
- [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] 齐雨藻. 中国淡水藻志-第四卷-硅藻门 中心纲. 北京: 科学出版社, 1995.
- [10] 朱蕙忠, 陈嘉佑. 中国西藏硅藻. 北京: 科学出版社, 2000.
- [11] 施之新, 王全喜, 谢树莲, 戴建寿. 中国淡水藻志-第六卷-裸藻门. 北京: 科学出版社, 1999.
- [12] Hillebrand H, Dürselen C D, Kirschtel D, Pollinger U, Zohary T. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of Phycology*, 1999, 35(2): 403-424.
- [13] Komissarov A B, Korneva L G. Taxonomical structure, ecological and geographic characteristics of phytoplankton of the Tvertsa River (Russia). *International Journal on Algae*, 2015, 17(2): 149-158.
- [14] Bilous O P, Lilitskaya G G, Kryvenda A A. Seasonal variability of southern Bug River upstream phytoplankton. *International Journal on Algae*, 2015, 17(1): 37-49.
- [15] Belous Y P, Klochenko P D. Phytoplankton taxonomical structure in the middle part of Southern Bug River (Ukraine). *International Journal on Algae*, 2015, 17(3): 253-262.
- [16] Sukhodol'Skaya I L, Manturova O V, Griuk I B. Phytoplankton of small rivers of the Rivne Region (Ukraine) and relation of its quantitative parameters with nutrients content. *Hydrobiological Journal*, 2015, 51(5): 50-61.
- [17] Dokulil M T, Donabaum U. Phytoplankton of the danube river; Composition and long-term dynamics. *Acta Zoologica Bulgarica*, 2014, 66(7): 147-152.
- [18] Piirsoo K. Phytoplankton of Estonian rivers in midsummer. *Hydrobiologia*, 2001, 444(1/3): 135-146.
- [19] Unni K S, Pawar S. The phytoplankton along a pollution gradient in the river Mahanadi (M.P. state) India-a multivariate approach. *Hydrobiologia*, 2000, 430(1/3): 87-96.
- [20] Descy J P. Ecology of the phytoplankton of the River Moselle; effects of disturbances on community structure and diversity. *Hydrobiologia*, 1993, 249(1/3): 111-116.
- [21] Huston M. A general hypothesis of species diversity. *The American Naturalist*, 1979, 113(1): 81-101.
- [22] 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.
- [23] Zalocar de Domitrovic Y. Structure and variation of the Paraguay River phytoplankton in two periods of its hydrological cycle. *Hydrobiologia*, 2002, 472(1/3): 177-196.
- [24] Santana L M, Moraes M E B, Silva D M L, Ferragut C. Spatial and temporal variation of phytoplankton in a tropical eutrophic river. *Brazilian Journal of Biology*, 2016, 76(3): 600-610.
- [25] Sharma J, Parashar A, Bagare P, Qayoom I. Phytoplanktonic diversity and its relation to physicochemical parameters of water at dogarwadaghat of River Narmada. *Current World Environment*, 2015, 10(1): 206-214.
- [26] 张婷, 李林, 宋立荣. 熊河水库浮游植物群落结构的周年变化. 生态学报, 2009, 29(6): 2971-2979.
- [27] 杨亮杰, 余鹏飞, 竺俊全, 徐镇, 吕光汉, 金春华. 浙江横山水库浮游植物群落结构特征及其影响因子. 应用生态学报, 2014, 25(2): 569-576.
- [28] Bortolini J C, Bueno N C. Seasonal variation of the phytoplankton community structure in the São João River, Iguazu National Park, Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 2013, 73(1): 1-14.
- [29] Reynolds C S. The long, the short and the stalled; on the attributes of phytoplankton selected by physical mixing in lakes and rivers. *Hydrobiologia*, 1994, 289(1/3): 9-21.
- [30] El-Karim M S A. Survey to compare phytoplankton functional approaches: How can these approaches assess River Nile water quality in Egypt? *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 2015, 41(3): 247-255.
- [31] Bovo-Scomparin V M, Train S, Rodrigues L C. Influence of reservoirs on phytoplankton dispersion and functional traits: a case study in the Upper Paraná River, Brazil. *Hydrobiologia*, 2013, 702(1): 115-127.
- [32] Clarson S J, Steinitz-Kannan M, Patwardhan S V, Kannan R, Hartig R, Schloesser L, Hamilton D W, Fusaro J K A, Beltz R. Some observations of diatoms under turbulence. *Silicon*, 2009, 1(2): 79-90.
- [33] Davey M C. The effects of nutrient depletion on the sinking velocity and cellular composition of a freshwater diatom. *Arch Hydrobiologia*, 1998, 112: 321-334.
- [34] Zhao C S, Liu C M, Xia J, Zhang Y Y, Yu Q, Eamus D. Recognition of key regions for restoration of phytoplankton communities in the Huai River basin, China. *Journal of Hydrology*, 2012, 420-421: 292-300.
- [35] 邱阳凌, 林育青, 刘俊杰, 唐磊, 关铁生, 陈求稳, 陈凯, 王丽. 淮河干流及主要支流夏季浮游植物群落生物多样性评价. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1665-1672.
- [36] 徐艳红, 于鲁冀, 吕晓燕, 范鹏宇. 淮河流域河南段退化河流生态系统修复模式. 环境工程学报, 2017, 11(1): 143-150.
- [37] Reynolds C S, Huszar V, Kruk C, Naselli-Flores L, Melo S. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 2002, 24(5): 417-428.