

DOI: 10.5846/stxb201504010651

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): - .

Wang C, Li X H, Lai Z N, Liu Q F. Biodiversity pattern of Euglenophyta in the river network of the Pearl River Delta, China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(18): - .

珠三角河网裸藻的多样性特征

王 超, 李新辉, 赖子尼*, 刘乾甫

中国水产科学研究院珠江水产研究所, 珠江水域渔业生态环境监测与评价功能实验室, 农业部珠江中下游渔业资源环境科学观测实验站, 广州 510380

摘要: 珠三角河网是珠江汇入南海的必经之地, 本研究对 2012 年该水域裸藻门及各属的多样性特征及影响因子进行系统阐释。调查期间共发现裸藻 12 属 84 种, 其中裸藻属是最主要类群, 其次为扁裸藻属和囊裸藻属。珠三角河网独特的地理位置和人类活动造成的水体富营养化是该水域裸藻物种多样性丰富的主要原因。季节特征显示, 丰水期裸藻的种类丰富度和生物量均明显高于枯水期。除了洪水引发的裸藻物种的外源供给增大外, 泄洪所带来的有机质的增加也是有利因素。此外, 丰水期对应的高温也是有益条件。空间特征存在明显的季节差异, 丰水期河网外侧站位的生物量和种类丰富度高于中部站位, 主要是受径流影响较大的原因; 枯水季节除广州附近站位的值明显偏高外, 其它站位间差异不大, 营养盐的空间格局是主要决定因素。尽管裸藻主要依赖于沿江静水水体中的外源供给, 分析表明, 其在随水流下行的过程中存在增长过程。不同藻属相对组成的结果显示, 扁裸藻属和囊裸藻属因属于生长缓慢的 K-选择策略型, 富集营养物质的能力不及裸藻属, 仅在枯水期与裸藻属形成互补优势。裸藻门及主要属的生物量与种类丰富度呈线性正相关关系, 偏重于多样性单峰模式的上升区。

关键词: 珠江三角洲; 河网; 裸藻; 多样性

Biodiversity pattern of Euglenophyta in the river network of the Pearl River Delta, China

WANG Chao, LI Xinhui, LAI Zini*, LIU Qianfu

Pearl River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science; Fishery Eco-environment Monitoring and Evaluation Function Laboratory of the Pearl River Valley; Experimental Station for Scientific Observation on Fishery Resources and Environment in the Middle and Lower Reaches of Pearl River, Guangzhou 510380, China

Abstract: The Pearl River Delta (PRD) in Guangdong province is one of the most prosperous areas of China. At the same time, a large increase in the production of domestic and industrial waste occurred because of this economic development, and a 10% increase in waste production is estimated to have occurred in the past few years. The complicated river delta system, characterized as criss-cross and multiple river channels, is the primary location at which the Pearl River reaches the South China Sea. Many studies have focused on physical and chemical factors functioning in this region, especially in recent years, but few have investigated their effects on aquatic organisms. To understand the temporal and spatial distribution patterns of Euglenophyta, a riverine phytoplankton community, seasonal investigations were carried out in the river delta area in 2012. Thirteen representative sampling sites settled cover almost the whole river delta area. The correlation between the species richness and the biomass of each genus, and environmental factors is also analyzed in order to identify the key components of the interaction mechanism, using the PCA method. Moreover, the regional characteristics

基金项目: 广东省海洋渔业科技专项 (A2011009); 广西省自然科学基金重大项目 (2013GXNSFEA053003); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201303056-5)

收稿日期: 2015-04-01; **网络出版日期:** 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: znlai01@163.com

of the phytoplankton biodiversity pattern were evaluated at the genus level, using these results. During the investigation, 84 taxonomic species (including variant and derivative) from 12 genera of Euglenophyta were identified. The high biodiversity in this area is the result of its characteristic geographic features and high rate of eutrophication due to human activities. Of all the genera of Euglenophyta, *Euglena* contributed most to species richness and biomass, followed by *Phacus* and *Trachelomonas*. Although euglenoids in rivers are mainly dependent on exterior supplements from the influx of lentic waters into the river ecosystems, the present results revealed that euglenoids could grow along the river flows. Seasonal variation patterns of species richness and biomass were high in wet seasons and low in dry seasons. Besides the exterior supplementation by water flows during flood periods, simultaneous augmentation of organisms by flows could also promote the growth of euglenoids. Moreover, the corresponding high temperatures present during flood periods also benefit the growth of euglenoids. The spatial distribution pattern of euglenoids showed apparent seasonal differences. During flood periods, the values of the outer sites were significantly higher than those of inner sites, a dynamic mainly associated with variations in flow conditions. In drought periods, the differences among the rural sites were not so significant, but the extremely high values in urban sites were the result of high nutrient influx. The contribution of different genera indicated that *Phacus* and *Trachelomonas* could only co-dominate with *Euglena* during drought periods, and exhibited the K-selection strategy, which is generally characterized by a slower nutrient gathering capacity. In addition, the relationship between the biomass and species richness of euglenoids was analyzed, and it had an incline to the ascending curve part of the unimodal function of global phytoplankton biodiversity patterns.

Key Words: Pearl River Delta; river web; Euglenophyta; biodiversity

珠江三角洲水系包括西江、北江思贤滘以下和东江石龙以下河网,最后分别经由虎门、蕉门、洪奇沥、横门、磨刀门、鸡啼门、虎跳门和崖门八个入海口流入南海。近年来,珠三角水域的水质不断恶化,《珠江片水资源公报 2011》显示,珠三角地区近 1/4 河段水质为劣 V 类。自上世纪 80 年代初由珠江水产研究所牵头对珠江水系渔业生态环境和水生生物资源进行过系统调查^[1]之后,有关该水域水生生物组成及动态变化的报道并不多见。裸藻门(Euglenophyta)是浮游植物群落中较低等的一个类群,除胶柄藻属外,都是无细胞壁,有鞭毛,能自由游动的单细胞植物^[2]。裸藻门中以裸藻科的种类最繁多,也最常见,其中尤以裸藻属(*Euglena*)、扁裸藻属(*Phacus*)和囊裸藻属(*Trachelomonas*)的物种组成最丰富。虽然至今尚未发现有毒的裸藻类水华,但是由于某些种类具有嗜污性和嗜酸性特征,因此具有一定的环境指示作用^[2]。裸藻属的多数物种具有明显的“裸藻状蠕动”特征,因此成为水环境污染指示研究的理想材料^[2]。其中,纤细裸藻(*Euglena gracilis*)在国内外水污染指示研究和毒理试验中已经得到了广泛应用^[3-5]。然而,截至目前有关自然水体中裸藻多样性特征的报道不多,一般仅在浮游植物群落调查研究中有所提及;少数针对性研究报道也偏重分类学研究^[6-7]。

在浮游植物多样性模式研究方面,Irigoien 等^[8]提出了全球海洋浮游植物多样性的单峰模式,作者在此基础上开展了延伸性研究,发现浮游植物多样性模式具有明显的区域特征和分级特征^[9-12]。本研究旨在了解珠三角河网水域裸藻的多样性特征,并分析其与环境因子的关联性,同时探讨生物多样性模式,为珠江中下游水域生物多样性保护及生态环境评价工作积累科学数据资料。

1 材料与方法

1.1 调查站位和时间

本次调查在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,站位布设图及站位分布特征描述见作者已发表的论文^[12]。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 月代表枯水季节,5 月和 8 月代表丰水季节,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。本文重点引用裸藻门的数据资料,鉴定过程参考专业分类学书籍^[2]。

物种生物量的计算方法参照 Hillebrand 等^[13],通过体积法计算取几何近似值,分析过程中将生物量在总种群中所占百分比大于 5%的物种定义为优势种。

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、溶解氧、电导率、总固体浓度和氧化还原电位,使用便携式水质分析仪(YSI6600-02, USA)测定,透明度数值用透明度盘测定。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)对营养盐成分包括磷酸盐、总磷、硝态氮、亚硝态氮、氨氮、总氮、高锰酸盐指数和硅酸盐进行分析,记录数据。

1.4 数据处理与分析

各季节和调查站位的裸藻种类丰富度数据采用种类数总和,生物量数据采用平均值。裸藻种类丰富度与生物量进行相关分析时,生物量数据取对数值。

裸藻的时空分布特征及多样性模式的结果图均用 Origin 8.5 软件完成;基于裸藻物种多样性特征对调查站位进行的自组织映射图谱(Self-organizing Map, SOM)分析,用 Matlab 软件和 Ann 数据包完成;而裸藻门不同类群的种类丰富度和生物量与环境因子之间关系分析用 Canoco 4.5 软件完成,并得到主成分分析(Principle Component Analysis, PCA)的二维降序图。

2 结果

2.1 物种组成

调查期间共采集样本 52 个,其中 49 个样本检出存在裸藻门物种,检出率为 94.23%。共鉴定裸藻 12 属 84 种,占浮游植物总种类数的 21.9%。裸藻属是调查水域裸藻门的最重要组成类群,其种类数达 29 种,占裸藻门总种类数的 34.12%;生物量均值为 383.49×10^{-4} mg/L,占裸藻门生物量均值的 63.29%;此外,裸藻属的出现率高达 80.77%,以上特征数据均远高于其他属。扁裸藻属和囊裸藻属的种类数和出现率均较为接近,分别位居第二和第三位,但是生物量差异很大,扁裸藻属的生物量均值高出囊裸藻属二倍。陀螺藻属和鳞孔藻属的特征数据均较为接近,分别位居第四和第五位。其他七个属均只鉴定 1 个物种,且出现率均低于 10%(表 1)。

2.2 裸藻门与浮游植物总种群的关系

将裸藻门种类丰富度与对应的浮游植物总种类丰富度进行二项式拟合分析,发现两者存在极显著($P < 0.0001$, $r^2 = 0.5201$)关联性,近乎单峰函数,且集中于上升区(图 1a);将裸藻门生物量的对数值与对应的总种群生物量的对数值进行线性回归分析,发现两者存在极显著意义($P < 0.0001$, $r = 0.6326$)的正相关关系(图 1b)。

2.3 调查站位在裸藻门物种组成上的相似性

基于裸藻门不同属的物种组成特征的相似性,采用自组织图谱法(SOM)分析不同季节调查站位在 SOM 图谱上的聚类 and 分布格局。根据 Vesanto(2000)^[14]提出的方法确定本文中自组织图谱的输出层由 81 个神经元组成,即 9×9 个六角晶格。每个季节的 13 个站位在 SOM 图谱上的分布情况见图 2。结果显示,枯水季节(3 月和 12 月)站位间的聚合性优于丰水季节(5 月和 8 月),说明枯水季节站位间的相似性较高,在相似性最高的 3 月份仅 5 个站位未与其他站位发生聚类,而在相似性最低的 8 月仅有 2 个站位发生聚类。具体到不同调查站位,莲花山与其他站位在裸藻组成上差异明显,4 个季节均未与其他站位发生聚类;某些站位的聚类呈

现明显的季节特征,如珠江桥、陈村、小塘、新围、外海和左滩仅在枯水季节与其他站位发生聚类;也有个别站位如横沥,仅在丰水季节与其他站位发生聚类。其他调查站位在裸藻门不同属的物种组成相似性上未呈现明显规律(图2)。

表 1 物种组成及生态特征特征数据列表(平均值和范围)
Table 1 Data list of ecological trait (means and ranges) of all genus in Euglenophyta

属名 Genus	总种类数 Total number of species	生物量($\times 10^{-4}$ mg/L) Biomass	对裸藻生物量贡献/% Biomass contribution to Euglenophyta	出现率/% Occurrence rate
裸藻属 <i>Euglena</i>	29	383.49(0—7537.50)	63.29(0—100)	80.77
囊裸藻属 <i>Trachelomonas</i>	16	54.30(0—1350)	8.96(0—100)	36.54
扁裸藻属 <i>Phacus</i>	18	120.11(0—2700)	19.82(0—100)	46.15
陀螺藻属 <i>Strombomonas</i>	9	18.21(0—450)	3.01(0—100)	13.46
鳞孔藻属 <i>Lepocinclis</i>	6	14.75(0—300)	2.43(0—33.33)	13.46
杆胞藻属 <i>Rhabdomonas</i>	1	3.46(0—90)	0.57(0—12.50)	5.77
异鞭藻属 <i>Anisonema</i>	1	0.87(0—45)	0.14(0—12.50)	1.92
长梭藻属 <i>Cyclidiopsis</i>	1	0.87(0—45)	0.14(0—12.50)	1.92
弦月藻属 <i>Menoidium</i>	1	0.87(0—45)	0.14(0—5)	1.92
袋鞭藻属 <i>Peranema</i>	1	5.12(0—75)	0.85(0—25)	9.62
双鞭藻属 <i>Eutreptia</i>	1	3.03(0—112)	0.50(0—12.50)	3.85
变胞藻属 <i>Astasia</i>	1	0.87(0—45)	0.14(0—6.25)	1.92

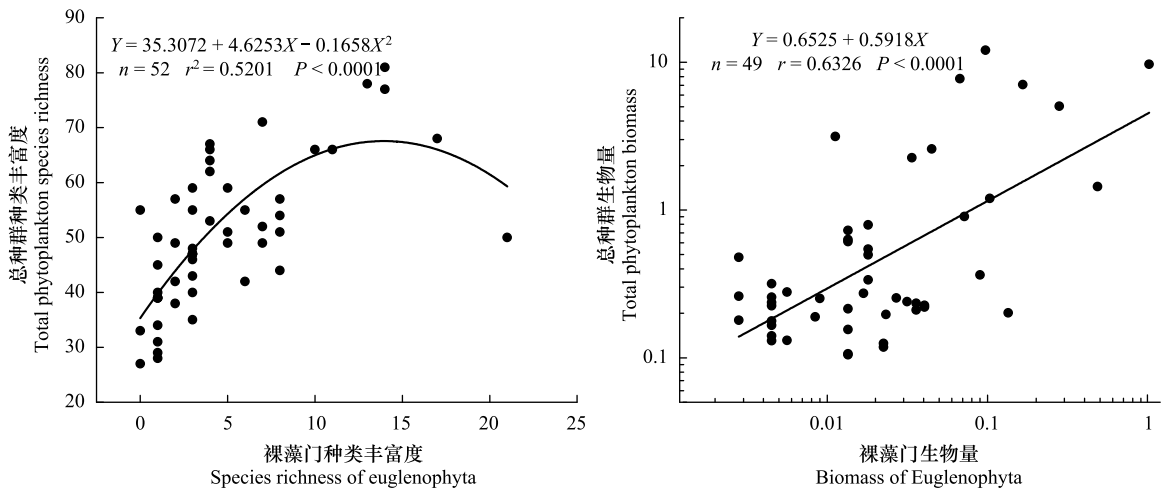


图 1 裸藻门与浮游植物总种群的关系
Fig.1 Relationship between Euglenophyta and total phytoplankton

2.4 裸藻门总种类丰富度与平均生物量的时空特征

调查期间,裸藻门总种类丰富度呈现丰水季节明显高于枯水季节的特征。总种类数的最大值出现在 5 月份,为 44 种,其次为 8 月份的 30 种;最小值为 3 月份的 25 种,12 月份的种类数也仅为 26 种。具体到不同调查站位种类数的季节特征,河网外侧站位的季节变动模式与裸藻门总种类数的季节特征一致,亦为丰水期高于枯水期;而河网中部站位除小塘和北滘外,其他站位季节间差异很小,特征不显著(图 3a)。

裸藻门总种类丰富度的空间特征显示,河网中部站位的种类丰富度一般低于河网外侧站位,但也发现个别中部站位的种类丰富度较高,如北滘的总种类数达 23 种。总种类数的最大值出现在珠江桥,为 31 种;次高值出现在市桥,为 28 种;最低值出现在小榄,为 4 种;次低值出现在榄核,为 7 种。具体到不同季节裸藻门种类丰富度的空间格局,丰水季节的空间格局与总种类丰富度的空间特征一致;而枯水季节的空间格局主要表

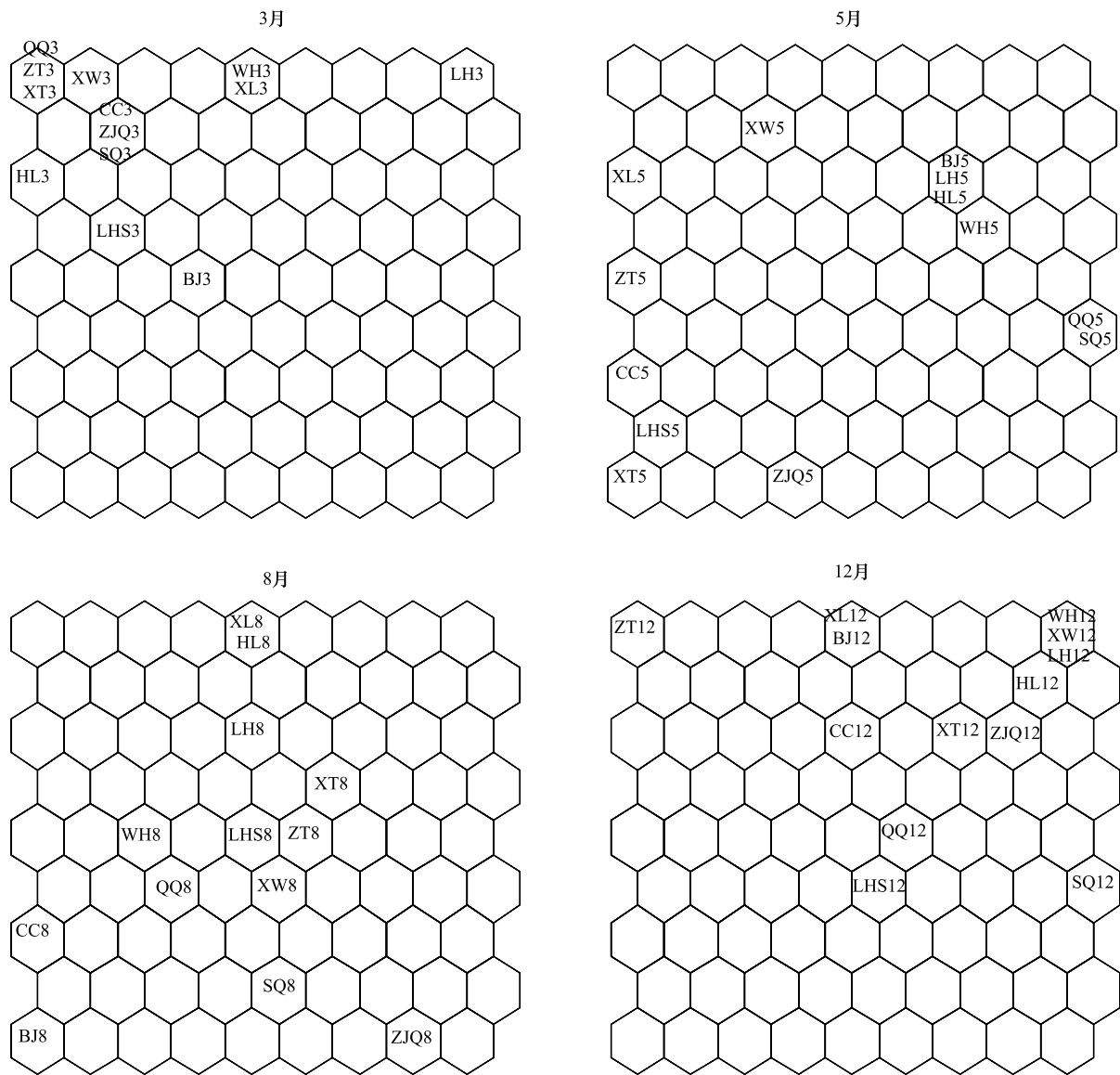


图 2 基于裸藻门不同属的物种组成相似性的 SOM 图谱

Fig.2 Self-organizing map of sampling sites based on the genus composition similarity of Euglenophyta

现为邻近广州各站位的种类数明显偏高,其他站点差异很小,特征不显著(图 3a)。

裸藻门生物量总均值的季节特征显示,丰水季节的生物量均值明显高于枯水季节。生物量总均值的最大值出现在 8 月,为 0.142 mg/L,其次为 5 月份的 0.056 mg/L;最低值出现在 3 月,为 0.019 mg/L,次低值为 12 月的 0.026 mg/L。具体站点特征为河网外侧站位的季节变动模式与裸藻门总均值的季节特征一致,为丰水期高于枯水期;而河网中部站点除小塘和北滘外,其他站位的季节间差异很小,特征不明显(图 3b)。

裸藻门生物量总均值的空间特征显示,河网中部站位的生物量一般低于河网外侧站点,仅个别中部站位的生物量较高,如北滘的生物量均值为 0.136 mg/L,为次高值。最大值出现在珠江桥,为 0.392 mg/L,最小值出现在小榄,为 0.004 mg/L,次低值为榄核的 0.009 mg/L。丰水季节的空间格局与生物量总均值的空间特征一致,而枯水季节表现为邻近广州各站位的生物量明显偏高,其他站位的季节间差异很小,特征不明显(图 3b)。

2.5 裸藻门各属的相对组成的时空特征

由图 4 可知,裸藻门各属种类丰富度的相对组成具有明显的时空分布特征。季节特征显示,枯水季节的

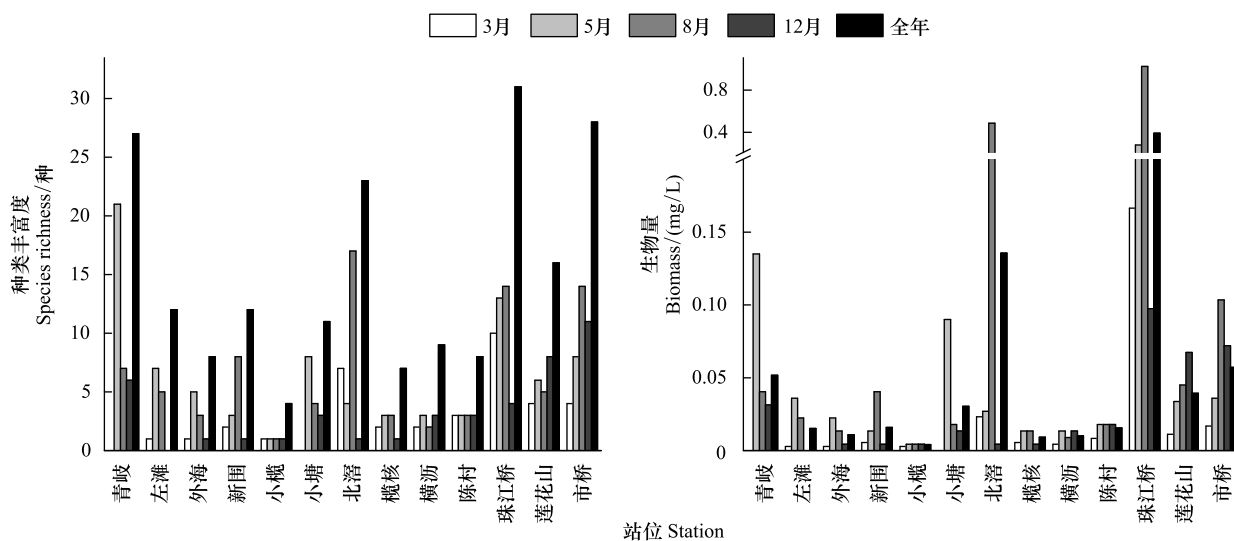


图3 裸藻门总种类丰富度和平均生物量的时空特征

Fig.3 Temporal and spatial pattern of total species richness and average biomass of Euglenophyta

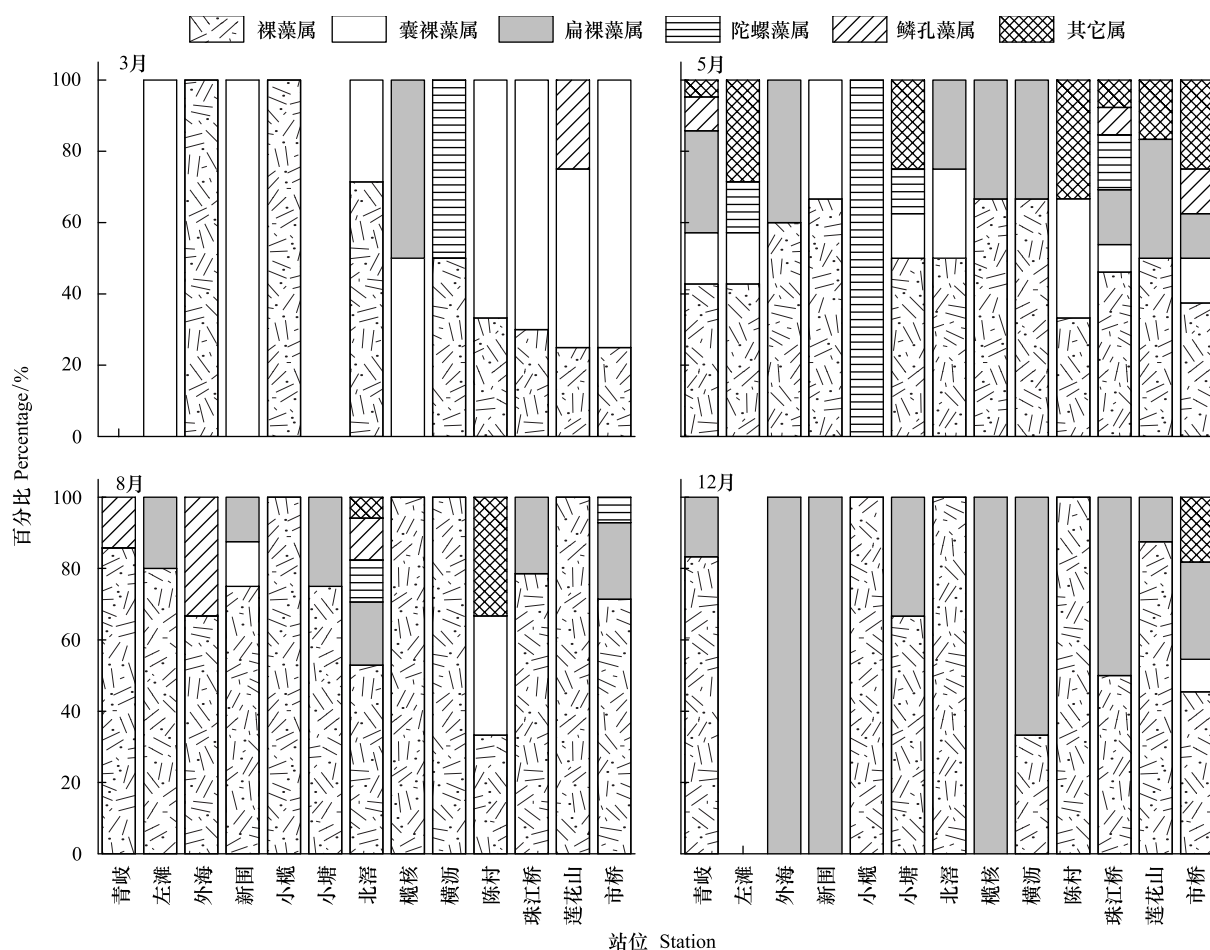


图4 裸藻门各属的种类丰富度相对组成的时空特征

Fig.4 Temporal and spatial pattern of relative contribution to species richness between different genera of Euglenophyta

种类组成相对单一,其中,3 月份的种类组成以裸藻属和囊裸藻属为主,而同为枯水季节的 12 月份的种类组成以裸藻属和扁裸藻属为主;丰水季节的种类组成较为丰富,尤其是 5 月份,其他各属的组成更加丰富,除小榄为单一属组成外,其他站位均多于 2 个属,且大多数站位多于 3 个属。尽管 5 月和 8 月的种类均以裸藻属为主要类群,但是 8 月份裸藻属的相对优势更加明显,其他属的比例较低(图 4)。

从空间格局角度看,不同季节的空间格局差异较大,且并未呈现明显的规律性。但是我们可以发现,枯水季节裸藻属在站位间的分布波动明显较大,且呈现不连续特征,而丰水季节裸藻属的空间分布相对稳定,5 月份一般不低于 40%,8 月份基本不低于 70%;囊裸藻属和扁裸藻属的空间格局分别在 3 月和 12 月与裸藻属呈现互补特征,尽管此二属在丰水季节各站位的相对组成中百分比明显下降,但仍优于除裸藻属之外其他各属,只是在站位间分布的连续性不强。其他各属在枯水季节少有出现,在丰水季节的空间分布也未呈现明显的规律。此外,小榄在各季节均由单一属组成,由此明显区别于其他站位(图 4)。

裸藻门各属生物量的相对组成的时空特征与种类丰富度基本一致,两者仅在各季节的个别站位(例如 3 月横沥,5 月小塘,8 月北滘及 12 月市桥)存在小的差异。枯水季节由于类群组成少,生物量与种类丰富度的时空分布差异小于丰水季节。丰水季节生物量与种类丰富度存在的差异也主要集中在类群组成丰富的站位(图 5)。

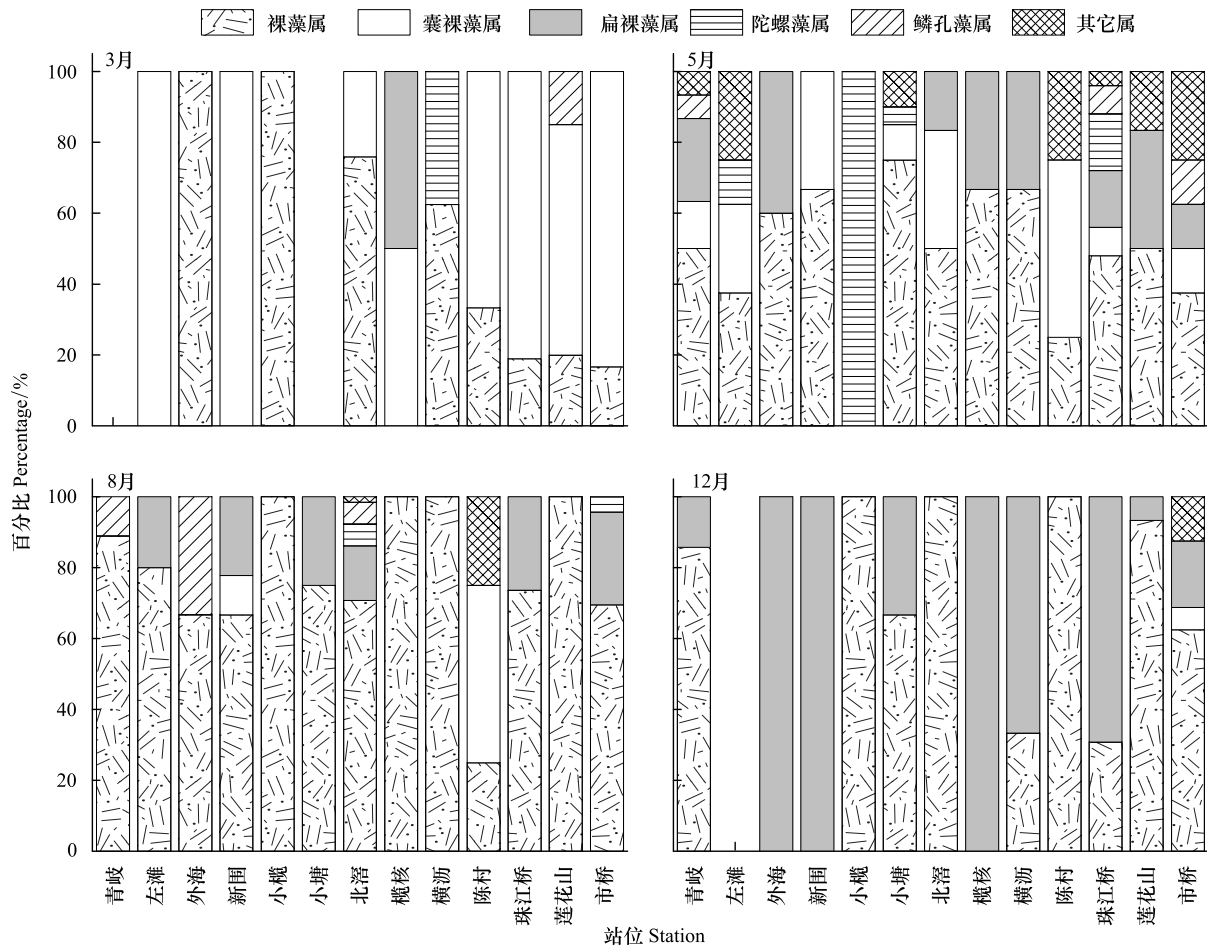


图5 裸藻门各属的生物量相对组成的时空特征

Fig.5 Temporal and spatial pattern of relative contribution to biomass between different genres of Euglenophyta

2.6 裸藻门及主要属的多样性模式

将裸藻门、裸藻属、囊裸藻属和扁裸藻属的生物量取对数值后与对应的种类丰富度进行线性拟合分析,结果表明裸藻门及各属的生物量与种类丰富度均存在紧密的关联。其中,裸藻门和裸藻属的多样性拟合关系接

近直线,呈极显著意义($P < 0.0001$, $r^2 > 0.75$)的正相关关系;而囊裸藻属和扁裸藻属拟合的指数曲线表明这两个属的多样性模式未呈现单一的线性正相关关系,且两者存在相反的变动趋势(图 6)。

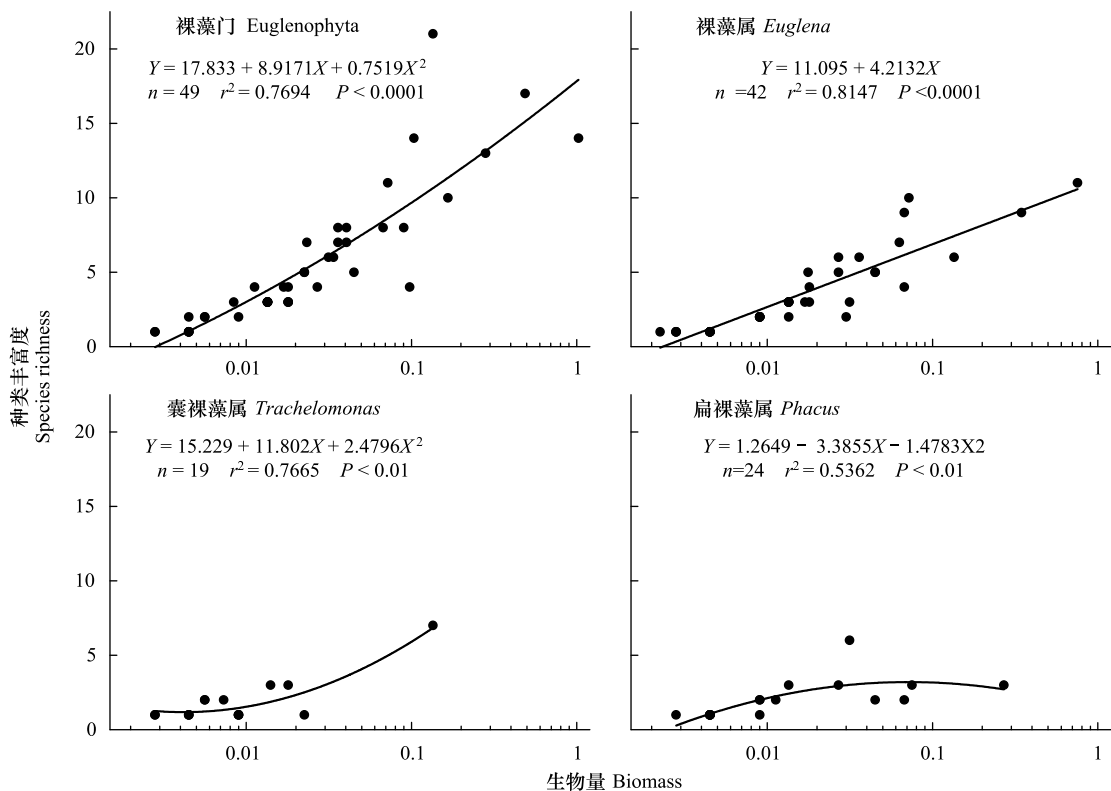


图 6 裸藻门及主要属的多样性模式

Fig.6 Diversity patterns of Euglenophyta and main genres

2.7 相关分析

用 Canoco 软件对裸藻门及各属的种类数和生物量数据分别进行去趋势对应分析 (Detrended Correspondence Analysis, DCA), 在所得的各特征值部分发现 4 个排序轴中梯度最大值均小于 3, 因此数据分析选用线性模型中的间接梯度分析 PCA 模型, 分别获得裸藻门及各属种类丰富度和生物量与 16 种水环境因子的 PCA 二维降序图(图 7)。

裸藻种类丰富度的分析图中, 第一、第二排序轴间的相关系数为 0, 表明这两个轴所包含的信息是独立的; 排序轴 1 和 2 的特征值分别为 0.626 和 0.157, 分别包含了所有变量的 62.6% 和 15.7% 的信息, 共计含有 16 种水环境因子的 78.3% 的信息, 所以可以用 PCA 二维降序图研究种类丰富度与 16 种环境因子间的相互关系。裸藻种类丰富度与环境因子第一个排序轴的相关系数为 0.73; 与环境因子第二个排序轴的相关系数为 0.78, 这表明 PCA 分析结果可以较好地解释裸藻种类丰富度与环境因子之间的关系(图 7a)。裸藻类群间的关系显示, 裸藻门与裸藻属的关系密切, 鳞孔藻属和其他属关系密切。与环境因子的关系显示, 水温、氨氮、溶解氧和透明度的变化与裸藻各类群种类数的增减关系最大, 其中水温和氨氮与各类群均呈正相关, 溶解氧和透明度与各类群呈负相关。此外, 除硝态氮以外的营养盐均与各类群种类丰富度呈正相关, 而硝态氮和透明度与各类群呈负相关。

裸藻生物量的分析图中, 排序轴 1 和 2 的特征值分别为 0.969 和 0.021, 分别包含了所有变量的 96.9% 和 2.1% 的信息, 共计含有 16 种水环境因子的 99.0% 的信息, 所以可以用 PCA 二维降序图研究各类群生物量与 16 种环境因子间的相互关系。裸藻生物量与环境因子第一个排序轴的相关系数为 0.78; 与环境因子第二个排序轴的相关系数为 0.87, 这表明 PCA 分析结果可以较好地解释裸藻各类群生物量与环境因子之间的关系(图 7b)。裸藻类群间的关系显示, 裸藻门、裸藻属和扁裸藻属的关系密切, 鳞孔藻属、陀螺藻属和其他属的关

系密切。与环境因子的关系显示,氨氮、高锰酸盐指数、水温、硝态氮和溶解氧的变化与裸藻各类群生物量的增减关系最大,其中氨氮、高锰酸盐指数和水温与各类群均呈正相关,硝态氮和溶解氧与各类群呈负相关。

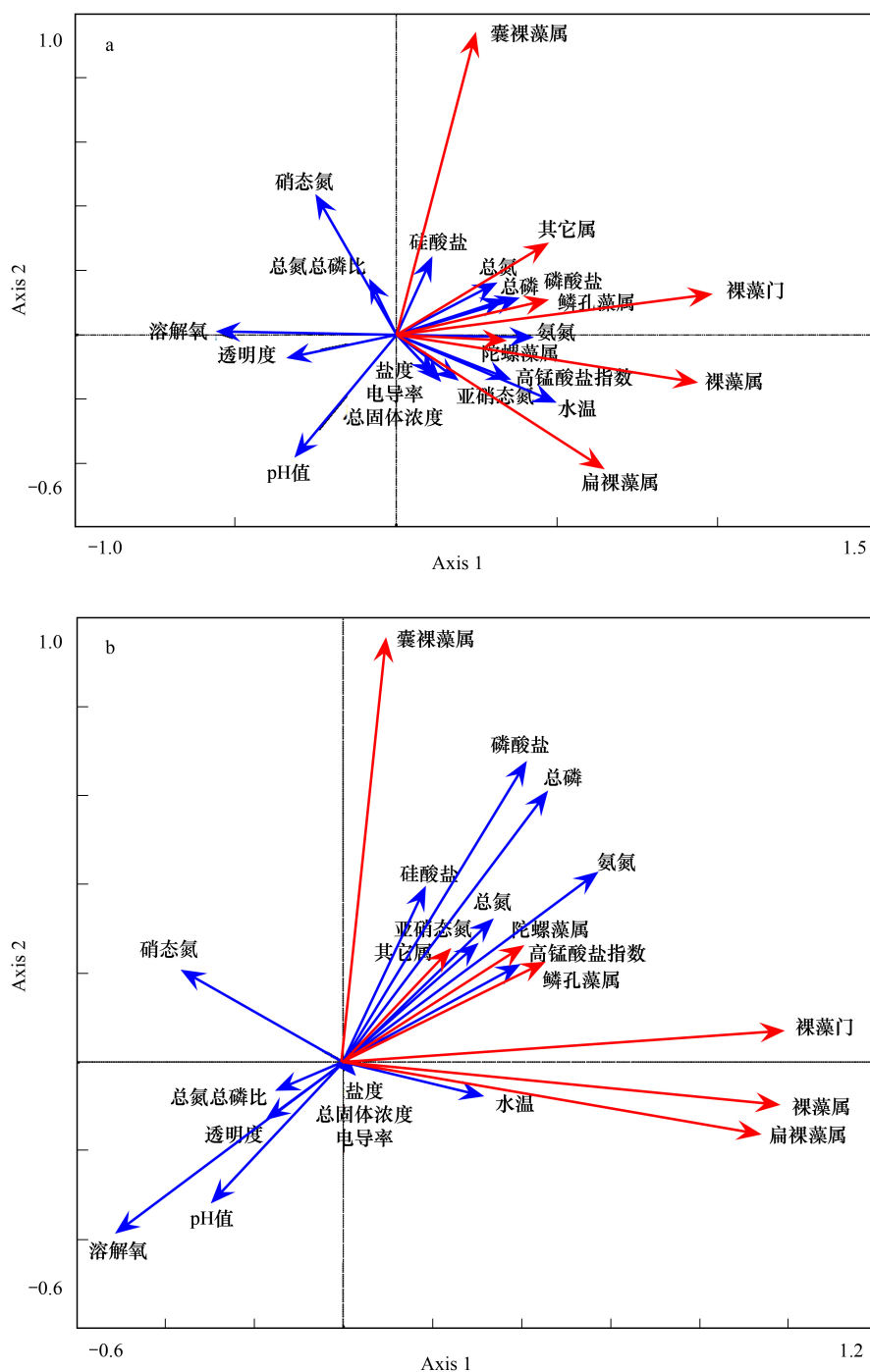


图 7 裸藻门及各属的种类数和生物量与环境因子的关系(a. 种类丰富度与环境;b. 生物量与环境)

Fig.7 Relationship between species richness and biomass of Euglenophyta and environmental factors (a. species richness; b. biomass)

3 讨论

研究结果显示,珠三角河网水域裸藻的出现率高,种类多样性丰富,且与浮游植物总种群的关联性高(图 1),因而是研究水域浮游植物群落中的一个重要类群。与国际上其他江河的研究结果相比,本研究水域裸藻的种类多样性及其百分比均明显偏高(表 2)。分析原因在于:其一,河网水源来自西江、北江和东江,调查结

果实际上包含了珠江干流、支流、沿江水库、洼地及水田等不同水体中的裸藻物种;其二,流域中的陆源污染物也汇集到河网水域,导致水体富营养化程度高,营养盐含量丰富,是不同藻类生长的营养支撑条件,从而保障了较高的藻类物种多样性。尤其是裸藻偏好污染水体^[19,28],因而研究水域的富营养化有助于裸藻多样性的提升。Duangjan 等^[29]在泰国农用池塘中发现囊裸藻 49 种,Alves-da-Silva 等^[7]在巴西一个人工湖泊中也发现囊裸藻 20 种,对比我们的结果,反映出静止水体中的裸藻多样性高于流动水体。研究人员发现,裸藻易在水库等静水水体形成优势种^[30],而在流动水体中较少形成优势,也说明了这一点。而裸藻在静水水体中的多样性和优势丰度也为流动水体中的补充供给提供了前提保障。此外,裸藻在浮游植物群落中的贡献及两者间的紧密关系表明,该类群在一定程度上可以反映浮游植物群落的动态变化。

作者的前期研究^[31]发现,裸藻和绿藻的种群动态变化存在紧密联系。分析原因在于,裸藻和绿藻在江河水体中的组成和丰度均主要依赖于从沿江相对静止水体中的外源汇入,在丰水期尤为显著^[32-33]。尽管如此,与该水域绿藻门中栅藻属物种的空间分布特征^[12]相比,裸藻在站位间分布的相似性明显偏低,丰水期甚至极少发生站位间的相似性聚合(图 2)。这种差异的原因在于,栅藻在调查水域的分布主要依赖于被动的漂流,其物种分布完全依赖于水流作用;而裸藻长有鞭毛,除了水动力因素外,其自身具备游泳能力,这也是影响裸藻在表层水体中分布的重要因素,进而影响到其空间分布上的相似性。

裸藻门及其主要藻属的生物量与种类丰富度基本呈线性正相关关系(图 6),两者的时空特征也非常相似(图 3—5)。这似乎暗示出,裸藻在调查水域的现存量主要依赖于外源汇入,在江河水体中的自主生长并不显著。仅从西江沿线的研究结果来看,肇庆江段发现裸藻 31 种^[34],与青岐站位的 27 种比较接近。但是,两个江段的裸藻生物量差异显著,青岐的年均值(0.052 mg/L)是肇庆段年均值(0.003 mg/L)的 17 倍,说明裸藻群体随水流下行过程中存在明显的增长过程。至于西江沿线青岐以下的三个站位(左滩、外海、新围)的种类丰富度和生物量均明显低于青岐,很可能是由于江河分流的原因造成的,因为这三个站位的值比较接近。

季节特征显示,生物量和种类丰富度均呈现丰水季节高于枯水季节,这主要是由于丰水季节水位上涨,流域中的静水水体(如水库、浅滩、水洼等)中的裸藻被动地涌入干流,最终汇入河网水域的原因^[31]。Montesanto 等^[16]在希腊 Mediterranean 江的研究表明,上游水库发生溢水时,下游裸藻的浓度有所增加,这同时也反映了泄洪所带来的有机物的供给作用。此外,丰水期对应的高温也是裸藻生长的有利条件,PCA 结果也显示,水温与裸藻的种类丰富度和生物量均存在正相关关系。空间特征显示,丰水期河网外侧站位的生物量和种类丰富度高于中部站位,主要是由于外侧站位受径流影响较大,裸藻物种和现存量的补充明显高于相对闭塞的河网中部站位的原因,因此外侧站位的季节变动模式亦表现为丰水季大于枯水季。与丰水期不同,枯水季节除广州附近站位的值明显偏高外,其他站位间差异不大。一是由于枯水期径流对物种的补充效应明显减弱,外加低温的不利影响,导致河网大部分站位的值明显偏低;其二营养盐的空间格局也是主要决定因素,PCA 分析结果也印证了这一点。广州邻近站位除营养盐含量明显偏高有利于裸藻生长外,由于位于虎门水道一侧,即使在枯水期也会受到较强的水流和潮汐涌动的影响,保证了裸藻的外源供给。调查期间,河网中部站位小榄均由单一藻属组成(图 4—5),分析发现此站位的氮磷营养盐含量明显低于其他站位。O'Farrell 等^[35]在阿根廷的 Luján 江的研究发现,裸藻的空间分布与有机污染物浓度密切相关。Wu 等^[36]在德国 Kielstau 江流域的研究也发现,裸藻对氮浓度的变化反应敏感。此外,河网中部个别站位(北滘)的值明显偏高,有可能是周边水体对裸藻组成和丰度有额外供给,或是局部水域的偶然性污染导致多样性和生物量均明显偏高,这一点在栅藻的空间分布特征^[12]方面也得到印证。

裸藻门不同藻属的相对组成结果显示,裸藻属是裸藻门的最主要类群,囊裸藻属和扁裸藻属次之,这与国际上其他江河的相对组成结果比较一致(表 2)。PCA 分析结果也表明,裸藻属与裸藻门的关系最紧密,在一定程度上可以反映裸藻门的变动(图 7)。裸藻属在丰水期的优势程度更明显,在枯水期的不稳定性较高,表现为与其他属形成互补优势,这与 Wu 等^[36]在德国 Kielstau 江的研究结果一致。与裸藻属相比,囊裸藻属和扁裸藻属的藻种属于生长缓慢的 K-选择策略型,富集营养物质的能力一般^[22],因此不利于其与裸藻属的竞

表 2 调查水域裸藻种类丰富度与其他江河的比较

Table 2 Comparison of species richness between studied area and other rivers											
江河名称 River name	时间 Date	裸藻门占总种 类数百分比/% Proportion of Euglenophyta in total species richness	裸藻门(种) Euglenophyta	裸藻属(种) <i>Euglena</i>	囊裸藻 属(种) <i>Trachelomonas</i>	扁裸藻 属(种) <i>Phacus</i>	陀螺藻 属(种) <i>Strombomonas</i>	鳞孔藻 属(种) <i>Lepocinclis</i>	参考文献 References		
Aliakmon river (希腊)	1995 年 4 月, 9 月		2	1			1			[15]	
	1995 年 1 月至 1996 年 1 月	13.1	16	2	6	5		3		[16]	
River Seonath (印度)	1995 年 1 月至 6 月	19.4	31	10	2	13	1	5		[17]	
River Enajögi (爱沙尼亚)	2001 年, 2003 至 2006 年	4.4	9							[18]	
River Yamuna (印度)	2002 至 2003 年	3.3	3	2		1				[19]	
Rideau River(德国)	1998 至 2000 年的 5 月至 9 月	3	22							[20]	
Po River(意大利)	2008 年 1 月至 12 月	1.5	4							[21]	
Daly River(澳大利亚)	2000 年 6 月至 11 月	5	13							[22]	
Ponjavica River(塞尔维亚)	2001 年 12 月, 2002 年 5 月至 11 月, 2005 年 11 月, 2008 年 3 月至 11 月	17	74							[23]	
São João River (巴西)	2008 年 8 月至 2009 年 7 月	16.7	37	11	9	8	6	1		[24]	
Upper Paraná River (巴西)	2007 年 5 月至 2008 年 4 月	10	17							[25]	
Han River(韩国)	2001 年 2 月至 2002 年 2 月, 2004 年 2 月至 2005 年 2 月	4	17							[26]	
Bahlui River Basin (罗马尼亚)	2007 年 4 月至 11 月		20	11	3	5		1		[27]	
珠三角河网(中国)	2012 年 3 月, 5 月, 8 月, 12 月	21.9	84	29	16	18	9	6		本文	

争。囊裸藻属和扁裸藻属主要在枯水季节呈现出明显优势,且分别在 3 月和 12 月与裸藻属形成互补优势。其中一个重要原因在于,囊裸藻属主要营底栖生活^[37-38],12 月份的透明度明显偏高(均值为 57.7 cm),不利于其悬浮在表层水体中。尽管扁裸藻属物种多为普生性种,其主要受到裸藻属和囊裸藻属的竞争影响,仅在 3 月份呈现一定的优势。

裸藻门及主要属的生物量与种类丰富度基本呈线性正相关关系,应该偏重于 Irigoien 等^[8]提出的单峰模式的上升区,这也丰富了淡水水域藻类多样性模式的区域特征和分级特征。

致谢:现场样本采集工作由杨婉玲、高原、曾艳艺等协助完成。中国科学院南海海洋研究所林强研究员对写作给予帮助,特此致谢!

参考文献 (References):

- [1] 陆奎贤. 珠江水系渔业资源. 广州: 广东科技出版社, 1990: 27-39.
- [2] 施之新. 中国淡水藻志: 第六卷 裸藻门. 北京: 科学出版社, 1999.
- [3] 张琼, 伍琴, 高香玉, 孔志明, 李梅. 二溴联苯醚对纤细裸藻的生态遗传毒性效应. 中国环境科学, 2010, 30(6): 833-838.
- [4] 刘炎, 石小荣, 崔益斌, 李梅. 高浓度氨氮胁迫对纤细裸藻的毒性效应. 环境科学, 2013, 34(11): 4386-4391.
- [5] Azizullah A, Jamil M, Richter P, Häder D P. Fast bioassessment of wastewater and surface water quality using freshwater flagellate *Euglena gracilis* — a case study from Pakistan. Journal of Applied Phycology, 2014, 26(1): 421-431.
- [6] Alves-Da-Silva S M, M. Bicudo C E. *Cryptoglena*, *Monomorphina* and *Phacus* (Euglenophyceae) of a reservoir in the State of Rio Grande do Sul, southern Brazil. Revista Brasileira de Botanica, 2009, 32(2): 253-270.
- [7] Alves-Da-Silva S M, Cabreira J C, Voos J G, Lobo E A. Species richness of the genera *Trachelomonas* and *Strombomonas* (pigmented Euglenophyceae) in a subtropical urban lake in the Porto Alegre Botanical Garden, RS, Brazil. Acta Botanica Brasiliica, 2013, 27(3): 526-536.
- [8] Irigoien X, Huisman J, Harris R P. Global biodiversity patterns of marine phytoplankton and zooplankton. Nature, 2004, 429(6994): 863-867.
- [9] 王超, 黄长江, 杜虹. 粤东柘林湾角毛藻(*Chaetoceros*)群落生态学特性的季节变化. 生态学报, 2008, 28(1): 237-245.
- [10] 王超, 黄长江, 杜虹. 粤东柘林湾根管藻(*Rhizosolenia*)群落组成的季节特征. 生态学报, 2008, 28(2): 559-569.
- [11] Wang C, Li X H, Lai Z N, Yao S H, Huang C J. The study on seasonal trait of *Nitzschia* population in Zhelin Bay of eastern Guangdong. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2008, 76(2): 319-326.
- [12] 王超, 李新辉, 赖子尼, 曾艳艺, 高原, 刘乾甫, 杨婉玲, Sovan L. 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.
- [13] 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.
- [14] Toolbox S, Vesanto J. Neural network tool for data mining: SOM Toolbox // Proceedings of Symposium on Tool Environments and Development Methods for Intelligent Systems (TOOLMET2000). Oulu, Finland: Oulun Yliopistopaino, 2000: 184-196.
- [15] Montesanto B, Tryfon E. Phytoplankton community structure in the drainage network of a Mediterranean river system (Aliakmon, Greece). International Review of Hydrology, 1999, 84(5): 451-468.
- [16] Montesanto B, Ziller S, Danielidis D B, Economou-Amilli A. Phytoplankton community structure in the lower reaches of a Mediterranean river (Aliakmon, Greece). Archiv für Hydrobiologie, 2000, 147(2): 171-191.
- [17] 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.
- [18] Piirsoo K, Pall P, Tuvikene A, Viik M. Temporal and spatial patterns of phytoplankton in a temperate lowland river (Emajõgi, Estonia). Journal of Plankton Research, 2008, 30(11): 1285-1295.
- [19] Tabasum T, Trisal C L. Progressive changes in phytoplankton community structure in urbanized lowland river floodplains—a multivariate approach. River Research and Applications, 2009, 25(9): 1109-1125.
- [20] 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.
- [21] Tavernini S, Pierobon E, Viaroli P. Physical factors and dissolved reactive silica affect phytoplankton community structure and dynamics in a lowland eutrophic river (Po river, Italy). Hydrobiologia, 2011, 669(1): 213-225.
- [22] Townsend S A, Przybylska M, Miloslis M. Phytoplankton composition and constraints to biomass in the middle reaches of an Australian tropical

- river during base flow. *Marine and Freshwater Research*, 2012, 63(1): 48-59.
- [23] Karadžić V, Simić G S, Natić D, Ržanićanin A, Ćirić M, Gačić Z. Changes in the phytoplankton community and dominance of *Cylindrospermopsis raciborskii* (Wolosz.) Subba Raju in a temperate lowland river (Ponjavica, Serbia). *Hydrobiologia*, 2013, 711(1): 43-60.
- [24] Bortolini J C, Bueno N C. Seasonal variation of the phytoplankton community structure in the São João River, Iguaçu National Park, Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 2013, 73(1): 1-14.
- [25] Jung S W, Kwon O Y, Yun S M, Joo H M, Kang J H, Lee J H. Impacts of dam discharge on river environments and phytoplankton communities in a regulated river system, the lower Han River of South Korea. *Journal of Ecology and Environment*, 2014, 37(1): 1-11.
- [26] Costică M. Contribution to knowledge of Euglenophyta in the Bahlui River Basin. *Analele științifice ale Universității "Al. I. Cuza" Iași Tomul LV*, fasc. 2, s. II a. Biologie vegetală, 2009.
- [27] 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.
- [28] Descy J P. Phytoplankton composition and dynamics in the River Meuse (Belgium). *Archiv für Hydrobiologie*, 1987, 78(2): 225-245.
- [29] Duangjan K, Wolowski K, Peerapornpisal Y. A taxonomic and ultrastructural study of *Trachelomonas* spp. (Euglenophyta) from agricultural area pond, Lamphun province. *Journal of the Microscopy Society of Thailand*, 2012, 5(1/2): 23-27.
- [30] Shcherbak V I, Kuzminchuk Y S. Influence of phytoplankton on the formation of the oxygen regime of the river ecosystem. *Hydrobiological Journal*, 2005, 41(3): 28-37.
- [31] 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.
- [32] Descy J P, Leita M, Everbecq E, Smits J S, Delière J F. Phytoplankton of the River Loire, France: a biodiversity and modelling study. *Journal of Plankton Research*, 2012, 34(2): 120-135.
- [33] Istvánovics V, Honti M, Vörös L, Kozma Z. Phytoplankton dynamics in relation to connectivity, flow dynamics and resource availability—the case of a large, lowland river, the Hungarian Tisza. *Hydrobiologia*, 2010, 637(1): 121-141.
- [34] 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.
- [35] O'Farrell I, Lombardo R J, de Tezanos Pinto P, Loez C. The assessment of water quality in the Lower Luján River (Buenos Aires, Argentina): phytoplankton and algal bioassays. *Environmental Pollution*, 2002, 120(2): 207-218.
- [36] Wu N C, Schmalz B, Fohrer N. Distribution of phytoplankton in a German lowland river in relation to environmental factors. *Journal of Plankton Research*, 2011, 33(5): 807-820.
- [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.
- [38] Crossetti L O, M. Bicudo C E. Adaptations in phytoplankton life strategies to imposed change in a shallow urban tropical eutrophic reservoir, Garças reservoir, over 8 years. *Hydrobiologia*, 2008, 614(1): 91-105.