

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

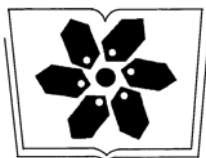
Acta Ecologica Sinica



第34卷 第7期 Vol.34 No.7 **2014**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 7 期

2014 年 4 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 青藏高原东北部 5000 年来气候变化与若尔盖湿地历史生态学研究进展 何奕忻, 吴 宁, 朱求安, 等 (1615)
- 天山云杉森林土壤有机碳沿海拔的分布规律及其影响因素 阿米娜木·艾力, 常顺利, 张毓涛, 等 (1626)

个体与基础生态

- 小兴安岭红松日径向变化及其对气象因子的响应 李兴欢, 刘瑞鹏, 毛子军, 等 (1635)
- 采伐剩余物对林地表层土壤生化特性和酶活性的影响 吴波波, 郭剑芬, 吴君君, 等 (1645)
- 庞泉沟自然保护区典型森林土壤大团聚体特征 白秀梅, 韩有志, 郭汉清 (1654)
- 思茅松天然林树冠结构模型 欧光龙, 肖义发, 王俊峰, 等 (1663)
- 镁缺乏和过量胁迫对纽荷尔脐橙叶绿素荧光特性的影响 凌丽俐, 黄 翼, 彭良志, 等 (1672)
- 斑块生境中食果鸟类对南方红豆杉种子的取食和传播 李 宁, 王 征, 鲁长虎, 等 (1681)
- 重金属铅与两种淡水藻的相互作用 刘 璐, 闫 浩, 李 诚, 等 (1690)
- 刺参养殖池塘初级生产力及其粒级结构周年变化 姜森颖, 周一兵, 唐伯平, 等 (1698)
- 控(微囊)藻鲢、鳙排泄物光能与生长活性 王银平, 谷孝鸿, 曾庆飞, 等 (1707)
- 五爪金龙中香豆素类物质含量及其对福寿螺、水稻和稗草的影响 犹昌艳, 杨 宇, 胡 飞, 等 (1716)

种群、群落和生态系统

- 西双版纳国家级自然保护区勐腊子保护区亚洲象种群和栖息地评价 林 柳, 金延飞, 陈德坤, 等 (1725)
- 莱州湾鱼类群落同功能种团的季节变化 李 凡, 徐炳庆, 马元庆, 等 (1736)
- 长期不同施肥方式对麦田杂草群落的影响 蒋 敏, 沈明星, 沈新平, 等 (1746)
- 极端干旱条件下燕麦垄沟覆盖系统水生态过程 周 宏, 张恒嘉, 莫 非, 等 (1757)

景观、区域和全球生态

- 流域景观格局变化对洪枯径流影响的 SWAT 模型模拟分析 林炳青, 陈兴伟, 陈 莹, 等 (1772)
- 近 20 年青藏高原东北部禾本科牧草生育期变化特征 徐维新, 辛元春, 张 娟, 等 (1781)
- 丽江城市不同区域景观美学 郭先华, 赵千钧, 崔胜辉, 等 (1794)
- 珠三角河网水域栅藻的时空分布特征 王 超, 李新辉, 赖子尼, 等 (1800)
- 博斯腾湖细菌丰度时空分布及其与环境因子的关系 王博雯, 汤祥明, 高 光, 等 (1812)
- 遗传算法支持下土地利用空间分形特征尺度域的识别 吴 浩, 李 岩, 史文中, 等 (1822)
- 川西亚高山不同海拔岷江冷杉树轮碳稳定同位素对气候的响应 靳 翔, 徐 庆, 刘世荣, 等 (1831)

基于 ESDA 的西北太平洋柔鱼资源空间热点区域及其变动研究 冯永玖,陈新军,杨铭霞,等 (1841)

城乡与社会生态

基于居民生态认知的非使用价值支付意愿空间分异研究——以三江平原湿地为例.....

..... 高 琴,敖长林,陈红光,等 (1851)

浑河河水及其沿岸地下水污染特征 崔 健,都基众,王晓光 (1860)

社会生态系统及脆弱性驱动机制分析 余中元,李 波,张新时 (1870)

研究简报

等渗 NaCl 和 Ca(NO₃)₂胁迫对黄瓜幼苗生长和生理特性的影响 周 珩,郭世荣,邵慧娟,等 (1880)

专家观点

关于“生态保护和建设”名称和内涵的探讨 沈国舫 (1891)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 282 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 29 * 2014-04



封面图说: 红豆杉人工林——红豆杉为常绿针叶乔木,树高可达 25m,属国家一级保护植物。红豆杉中含有的紫杉醇,具有独特的抗癌机制和较高的抗癌活性,能阻止癌细胞的繁殖、抑制肿瘤细胞的迁移,是世界公认的抗癌药。红豆杉在我国共有 4 个种和 1 个变种,即云南红豆杉、西藏红豆杉、东北红豆杉、中国红豆杉和南方红豆杉(变种)。由于天然红豆杉稀缺,国家严禁采伐利用,因而我国南方很多地方都采取人工种植的方法生产利用。人工种植的南方红豆杉在南方山区多呈斑块状分布,斑块生境中鸟类对红豆杉种子的传播有重要的影响。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201306201749

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.

Wang C, Li X H, Lai Z N, Zeng Y Y, Gao Y, Liu Q F, Yang W L, Lek S. Temporal and spatial pattern of *Scenedesmus* in the river web of the Pearl River Delta, China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(7): 1800-1811.

珠三角河网水域栅藻的时空分布特征

王 超^{1,2,3,4}, 李新辉^{1,2,3}, 赖子尼^{1,2,3,*}, 曾艳艺^{1,2,3}, 高 原^{1,2,3},
刘乾甫^{1,2,3}, 杨婉玲^{1,2,3}, LEK Sovan⁴

(1. 中国水产科学研究院珠江水产研究所, 广州 510380; 2. 珠江水域渔业生态环境监测与评价功能实验室, 广州 510380;

3. 农业部珠江中下游渔业资源环境科学观测实验站, 广州 510380; 4. Université Toulouse, Laboratoire Evolution & Diversité Biologique, UMR 5174, CNRS-Université Paul Sabatier, 118, route de Narbonne, 31062 Toulouse, Cedex4, France)

摘要: 珠三角河网水域是珠江之水流入南海的必经之地, 对 2012 年该水域浮游植物群落中的栅藻种类丰富度和生物量的时空特征及其环境影响因子进行系统阐释。调查期间共发现栅藻 24 种(包括变种、变型), 其中具刺和无刺种类分别为 11 种和 13 种。出现率高且生物量贡献率大的物种仅 3 种, 包括被甲栅藻原变种(*Scenedesmus armatus* var. *armatus*)、被甲栅藻博格变种双尾变型(*S. armatus* var. *boglariensis* f. *bicaudatus*)和二形栅藻(*S. dimorphus*), 分析认为这 3 个物种在栅藻种群中的生态优势很可能与其形态特征存在一定的关联。栅藻种类丰富度的季节分布呈现丰水期高于枯水期的特征, 空间分布呈现河网中部站位低于外侧站位的特征。此外, 种类丰富度的空间分布格局存在季节差异, 丰水季节呈现河网中部站位明显低于外侧站位的特征, 而枯水季节西江沿线站位种类丰富度明显偏低。分析认为, 水温和径流是影响栅藻种类丰富度季节变动的关键因素; 同时, 径流也是影响总种类丰富度空间分布格局的关键因素, 而水温和营养盐是影响不同季节种类丰富度的空间格局的重要因素。栅藻种群生物量的季节分布呈现丰水期高于枯水期的特征, 空间分布表现为珠江桥站位的生物量明显高于其它站位。分析认为, 径流和水温是决定种群生物量季节变动的关键因素, 而营养盐、水体稳定性和盐度是决定生物量空间分布格局的关键因素。栅藻生物量与种类丰富度的关系基本符合单峰模型, 且偏重于单峰模型的上升区, 丰富了全球多样性模式的分级特征和区域特征。

关键词: 珠江三角洲; 河网; 栅藻; 时空特征

Temporal and spatial pattern of *Scenedesmus* in the river web of the Pearl River Delta, China

WANG Chao^{1,2,3,4}, LI Xinhui^{1,2,3}, LAI Zini^{1,2,3,*}, ZENG Yanyi^{1,2,3}, GAO Yuan^{1,2,3}, LIU Qianfu^{1,2,3}, YANG Wanling^{1,2,3}, LEK Sovan⁴

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

2 Fishery Eco-environment Monitoring and Evaluation Function Laboratory of the Pearl River Valley, Guangzhou 510380, China

3 Experimental Station for Scientific Observation on Fishery Resources and Environment in the Middle and Lower Reaches of Pearl River, Guangzhou 510380, China

4 Université Toulouse, Laboratoire Evolution & Diversité Biologique, UMR 5174, CNRS-Université Paul Sabatier, 118, Route de Narbonne, 31062 Toulouse, Cedex4, France

Abstract: The Pearl River Delta (PRD) in Guangdong province is one of the most economically prosperous areas in China. A large number of domestic and industrial wastes are produced together with the economic development and 10% of waste

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: 2013-06-20; 修订日期: 2013-11-15

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

output in growth rate has been estimated in the past few years. The complicated river web of the delta, which is characterized as criss-cross and multiple river channels, is the essential entrance for the Pearl River water entering into the South China Sea. Many studies have been focusing on physical and chemical factors of this region, but few referred to aquatic organisms, especially in recent years. To understand the temporal and spatial distribution pattern of *Scenedesmus*, a common green algal group of riverine phytoplankton community, seasonal investigation has been carried out in the river web area in 2012. The thirteen representative sampling sites settled covered almost the whole area and shaped in umbrella-type. The coherence between the biomass of each taxa and environmental factors was also analyzed using PCA method to evaluate the key factors for explaining the interaction mechanisms. Also, the regional characteristics of phytoplankton biodiversity pattern were evaluated from the genus level based on the results.

During the investigation, the total 24 taxonomic species (including variant and derivative) were identified, including 11 taxa with spines and 13 taxa none. Although several species showed high occurrence rate, their contribution to total phytoplankton biomass was low, and less than 1% in terms of averages. However, relative abundance between different taxa was closely related to their occurrence rate. Three species (*S. armatus* var. *armatus*, *S. armatus* var. *boglariensis* f. *bicaudatus*, *S. dimorphus*) showed relatively high values in both occurrence and biomass, which was assumed related to their special morphological features. Seasonal variation pattern of both species richness and biomass indicated high in wet seasons and low in dry seasons, water temperature and discharge have been found to be responsible for this through the PCA analysis. Water temperature mainly influenced the growth and physiological conditions of *Scenedesmus*, while discharge mainly determined the exterior supplement of the algae. The spatial distribution pattern of total species richness showed high in outside stations and low in central stations, but this pattern had apparent seasonal differences. The patterns of May and August were in accordance with that of the total, and the patterns of March and December just showed high values in sampling sites close to Guangzhou. Through the PCA analysis, discharge, water temperature and nutrients have been found to be the key factors to influence this spatial pattern. The spatial distribution pattern of biomass showed extremely higher in ZJQ than those in other stations. Nutrients, water stability and salinity have been found to be the key factors for the spatial pattern through the PCA analysis. In addition, the relationship between *Scenedesmus* biomass and species richness was analyzed, and it was in consistent with the global phytoplankton biodiversity pattern, and had an incline to ascending part of the model, which also promotes the grading and regional understanding of the global diversity pattern.

Key Words: the Pearl River Delta; river web; *Scenedesmus*; temporal and spatial pattern

珠江三角洲水系包括西江、北江思贤以下和东江石龙以下河网水系,河道密布,交织成网,最后分别经由虎门、蕉门、洪奇沥、横门、磨刀门、鸡啼门、虎跳门和崖门八个人海口流入南海。近年来,珠三角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》^①显示,珠三角近 1/4 河段水质为劣 V 类。尽管有关珠三角河网水域的水文和理化环境特征的研究报道很多,但是自 20 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]后,有关该水域水生生物组成及动态变化的报道很少。本研究小组于 2012 年对该水域进行了季节性调查,内容涉及鱼类群落、浮游生物、水化因子、重金属及有机污染物等。

栅藻(*Scenedesmus* sp.)隶属于绿藻门(Chlorophyta),

绿藻纲(Chlorophyceae),绿球藻目(Chlorococcales),真集结体亚目(Eucoenobianae),栅藻科(Scenedesmaaceae),栅藻属(*Scenedesmus*)^[2-3]。该属物种是淡水水体中极为常见的浮游藻类,易在营养丰富的静水水体中繁殖。其中,许多物种对有机污染物具有较强的耐性,在水质评价中可作为指示生物,如斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)是甲型中污带的指示种;尖细栅藻(*S. acuminatus*)、弯曲栅藻(*S. arcuatus*)、被甲栅藻(*S. armatus*)和四尾栅藻(*S. quadricauda*)等是乙型中污带的指示种。目前国内外有关栅藻的针对性研究主要是在室内培养的基础上开展生物能源^[4-5]、毒理效应^[6-7]、生理^[8]及分子生物学^[9]等方面的研究;生态学方面主要是在浮游植物群落研究

① 《珠江片水资源公报 2011》相关内容转引自广州科普网,网址 <http://kepu.gzst.net.cn/d51133.aspx>.

中作为优势种介绍^[10-11], 尽管也有少数针对性研究涉及栅藻的生物多样性及生态分布^[12], 但主要集中于湖泊、水库等静水水体, 有关江河生态系统中栅藻的针对性研究仍不多见。

Irigoién 等^[13]对全球海洋浮游植物多样性模式的研究发现, 浮游植物群落多样性是生物量的单峰函数。群落多样性特征是由组成单元的特征相叠加的结果, 并对属这一小单元进行了针对性研究。前期研究发现, 柘林湾角毛藻 (*Chaetoceros*)^[14] 和根管藻 (*Rhizosolenia*)^[15] 的多样性与种群丰度均存在显著正相关关系, 表明这两个属的种群变动位于单峰模型的上升区, 而菱形藻 (*Nitzschia*) 的多样性与种群丰度存在显著负相关关系^[16], 位于单峰模型的下降区, 以上研究结论丰富了全球多样性模型的分级特征和区别特征。本研究在介绍 2012 年珠三角河网水域栅藻多样性组成、时空分布特征及其与环境因子的相关性的同时, 探讨该水域栅藻多样性与生物量之间的关系, 丰富浮游植物多样性模式的相关研究, 为珠江中下游水域生物多样性及生态环境评价

和保护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

调查水域为本研究小组在西江肇庆段长期监测点下游的珠三角河网水域, 在该水域布设 13 个采样站位, 基本形成伞状布局, 具体布设如图 1 所示, 包括青岐 (QQ)、左滩 (ZT)、外海 (WH)、新围 (XW)、小榄 (XL)、小塘 (XT)、北滘 (BJ)、榄核 (LH)、横沥 (HL)、陈村 (CC)、珠江桥 (ZJQ)、莲花山 (LHS) 和市桥 (SQ)。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干流入磨刀门一线, 小榄、小塘、北滘、榄核、横沥、陈村和市桥位于纵横交错的河网内部, 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 (图 1)。采样时的站位定位采用 GPS 全球卫星定位系统。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, 每个季度的采样工作均在 2—3d 内完成。

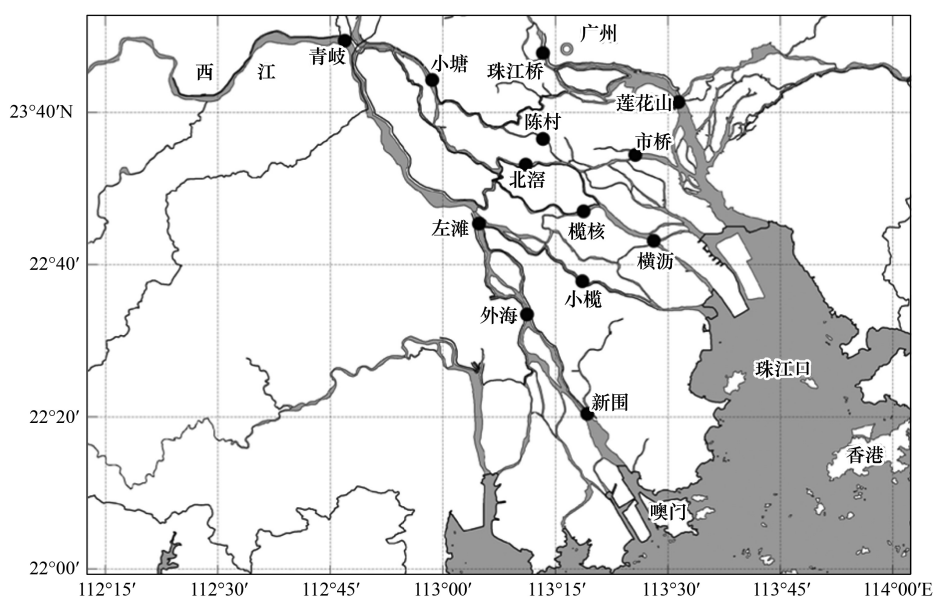


图 1 调查站位布设图

Fig.1 Map of sampling sites

1.2 样本采集、处理及数据收集

浮游植物样本取表层 (离水面 0.5 m) 水样 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 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, 本文重点引用栅藻的数据。

现场环境因子用便携式水质分析仪 (YSI6600-02, USA)、透明度盘等测定, 另取 500 mL 水样, 现场

过滤后置入带冰块冷藏箱中运回实验室,用水质流动注射分析仪(SKALAR,荷兰)进行营养盐分析。

1.3 水质评价

依据地表水环境质量标准(GB3838—2002)。

1.4 藻类数据处理与分析

浮游植物生物量的计算方法参照 Hillebrand 等^[17],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%的物种定为优势种。

本文中的基本结果图用 Origin 6.1 软件完成,基于栅藻物种组成对调查站位进行的自组织影射图谱(SOM)分析用 Matlab 软件完成,而物种丰度变化与环境因子之间的关系分析用 Canoco 4.5 软件完成,并得到 PCA 二维降序图。

2 结果

2.1 水文环境

文章中所阐述的珠三角河网水文环境数据及水质评价结果引自作者报道的资料^[18]。

距离广州最近的两个站位(珠江桥和莲花山)的理化环境特征与其它站位存在显著差异,其中水温、盐度、营养盐含量和高锰酸盐指数明显偏高,而 pH、透明度和溶解氧明显偏低。参照地表水环境质量标准,调查水域的总氮含量均劣于 V 类水标准,总磷含量除珠江桥为劣 V 类、莲花山和市桥为 IV 类外,其它

站位水质均属于 III 类水标准,而溶解氧和高锰酸盐指数显示,珠江桥和莲花山介于 IV 类和 V 类水之间,其它站位介于 II 类和 III 类水之间。总体而言,调查水域总氮超标严重,珠江桥甚至超出标准 3 倍多;珠江桥和莲花山水质属于劣 V 类水标准,其它站位基本介于 II 类和 III 类水之间。

2.2 物种组成

调查期间共采集样本 52 个,其中 50 个样本检出存在栅藻物种,检出率为 96.15%。共发现栅藻 24 种(包括变种、变型),其中具刺种类 11 种,无刺种类 13 种,种类名录及对应的生态特征数据(包括生物量、出现率和贡献率)见表 1。结果显示,不同栅藻物种的生物量及贡献率大小与出现率关系紧密,一般出现率高的物种的生物量和贡献率也高,反之则低。从不同物种对总群落生物量的贡献看,所有种类的生物量均值贡献率均小于 1%,大于 0.1%的种类仅有被甲栅藻原变种(0.68%)、被甲栅藻博格变种双尾变型(*S. armatus* var. *boglariensis* f. *bicaudatus*, 0.31%)和二形栅藻(*S. dimorphus*, 0.29%);这 3 个物种的出现率也是最高的,分别为 90.38%、75.00%和 80.77%。此外,出现率较高的物种还包括斜生栅藻(55.77%)、奥波莱栅藻(*S. opoliensis*, 53.85%)和尖细栅藻(43.31%),其对应的生物量较其它物种也偏高。从优势种组成情况看,所有种类中仅被甲栅藻原变种在 5 月份的 4 个站位达到优势种标准(表 1)。

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 List of taxa composition and ecological characteristics (Averages and ranges)

| 种名 Species name | 生物量/($\times 10^{-4}$ mg/L) Biomass | 对总群落生物量贡献/% Contribution to total abundance | 出现率/% Occurrence rate |
|--|---|---|--------------------------|
| 丰富栅藻原变种 <i>Scenedesmus abundans</i> var. <i>abundans</i> | 0.07(0—3.60) | 0.001(0—0.20) | 1.92 |
| 丰富栅藻不对称变种 var. <i>asymetrica</i> | 0.07(0—3.60) | 0.001(0—0.20) | 1.92 |
| 尖细栅藻 <i>S. acuminatus</i> | 5.76(0—72.00) | 0.05(0—0.68) | 43.31 |
| 尖形栅藻 <i>S. acutiformis</i> | 0.94(0—10.80) | 0.01(0—0.49) | 21.15 |
| 弯曲栅藻 <i>S. arcuatus</i> | 9.97(0—288.00) | 0.08(0—0.68) | 30.77 |
| 被甲栅藻原变种 <i>S. armatus</i> var. <i>armatus</i> | 84.90(0—1152.00) | 0.68(0—7.02) | 90.38 |
| 被甲栅藻博格变种 var. <i>boglariensis</i> | 1.23(0—18.00) | 0.01(0—0.31) | 17.31 |
| 被甲栅藻博格变种双尾变型 f. <i>bicaudatus</i> | 38.90(0—612.00) | 0.31(0—4.18) | 75.00 |
| 双对栅藻 <i>S. biguga</i> | 4.26(0—144.00) | 0.03(0—0.60) | 32.69 |
| 龙骨栅藻 <i>S. carinatus</i> | 0.49(0—3.60) | 0.004(0—0.23) | 13.46 |
| 齿牙栅藻 <i>S. denticulatus</i> | 4.67(0—144.00) | 0.04(0—0.70) | 19.23 |
| 二形栅藻 <i>S. dimorphus</i> | 35.60(0—720.00) | 0.29(0—1.83) | 80.77 |
| 颗粒栅藻 <i>S. granulatus</i> | 5.17(0—180.00) | 0.04(0—1.13) | 25.00 |
| 厚顶栅藻 <i>S. incrassatus</i> | 0.04(0—2.30) | 0.001(0—0.01) | 1.92 |
| 爪哇栅藻 <i>S. javaensis</i> | 4.72(0—144.00) | 0.04(0—0.64) | 17.31 |
| 斜生栅藻 <i>S. obliquus</i> | 11.60(0—108.00) | 0.09(0—4.12) | 55.77 |

续表

| 种名 Species name | 生物量/($\times 10^{-4}$ mg/L) Biomass | 对总群落生物量贡献/% Contribution to total abundance | 出现率/% Occurrence rate |
|------------------------------------|---|---|--------------------------|
| 奥波莱栅藻 <i>S. opoliensis</i> | 6.13(0—72.00) | 0.05(0—1.03) | 53.85 |
| 椭圆栅藻 <i>S. ovalternus</i> | 0.76(0—36.00) | 0.01(0—0.17) | 3.84 |
| 裂孔栅藻 <i>S. perforates</i> | 0.04(0—2.30) | 0.001(0—0.01) | 1.92 |
| 扁盘栅藻 <i>S. platydiscus</i> | 0.49(0—18.00) | 0.004(0—0.06) | 3.85 |
| 凸头状栅藻 <i>S. producto-capitatus</i> | 0.35(0—12.00) | 0.003(0—0.04) | 3.85 |
| 四尾栅藻 <i>S. quadricauda</i> | 1.47(0—18.00) | 0.01(0—1.01) | 23.08 |
| 多棘栅藻 <i>S. spinosus</i> | 0.21(0—3.60) | 0.002(0—0.07) | 5.77 |
| 武汉栅藻 <i>S. wuhanensis</i> | 0.07(0—3.60) | 0.001(0—0.20) | 1.92 |

2.3 物种空间分布的相似性

基于栅藻物种组成的相似性,采用自组织图谱法(SOM)分析不同季节调查站位的分布格局。根据Vesanto^[19]确定本文中自组织图谱的输出层由56个神经元组成,即8×7个六角晶格。每个季节的13个站在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)站位间的相似性明显高于丰水季节。具体到不同调查站位,珠江桥与其它站

位在栅藻组成上差异明显,全年均未与其它站位发生聚类;某些站位的聚类呈现明显的季节特征,如莲花山仅在丰水季节与其它站位聚类;同在西江沿线的左滩、外海和新围3个站位在枯水季节的相似性高,而在丰水季节相互之间的相似性均不高。其它调查站位在栅藻组成的相似性上未呈现明显规律(图2)。

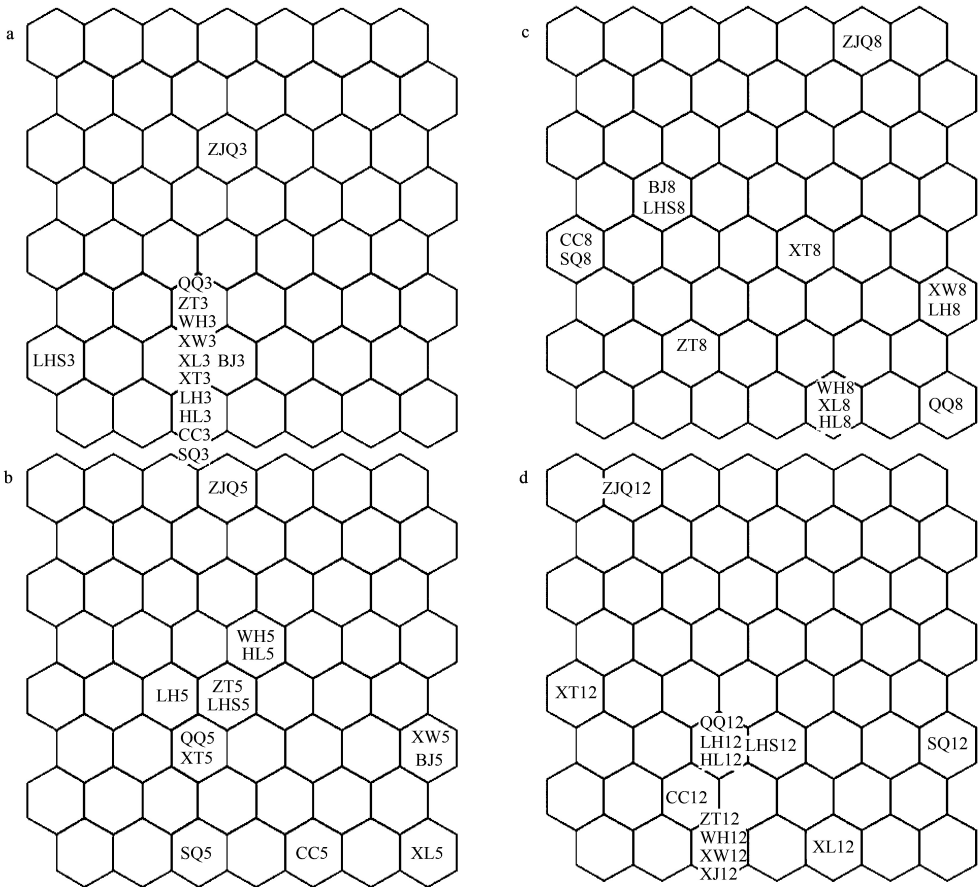


图2 基于栅藻物种组成相似性的调查站位SOM图谱(a. 3月;b. 5月;c. 8月;d. 12月)
Fig.2 Self-organizing map of sampling sites based on *Scenedesmus* taxa similarity

2.3 常见栅藻的群体组成特征

调查期间未发现栅藻物种出现群体聚群现象,3个最常见种(被甲栅藻原变种、被甲栅藻博格变种双尾变型和二形栅藻)的群体组成特征见图3。3个物种在3月份均以4细胞群体为绝对优势组成,但是被甲栅藻原变种和双尾变型在其它季节的群体组成中2细胞群体出现明显增长(图3),而二形栅藻依然以4细胞群体为绝对优势组成,只是2细胞群体和8细胞群体数略有升高(图3)。

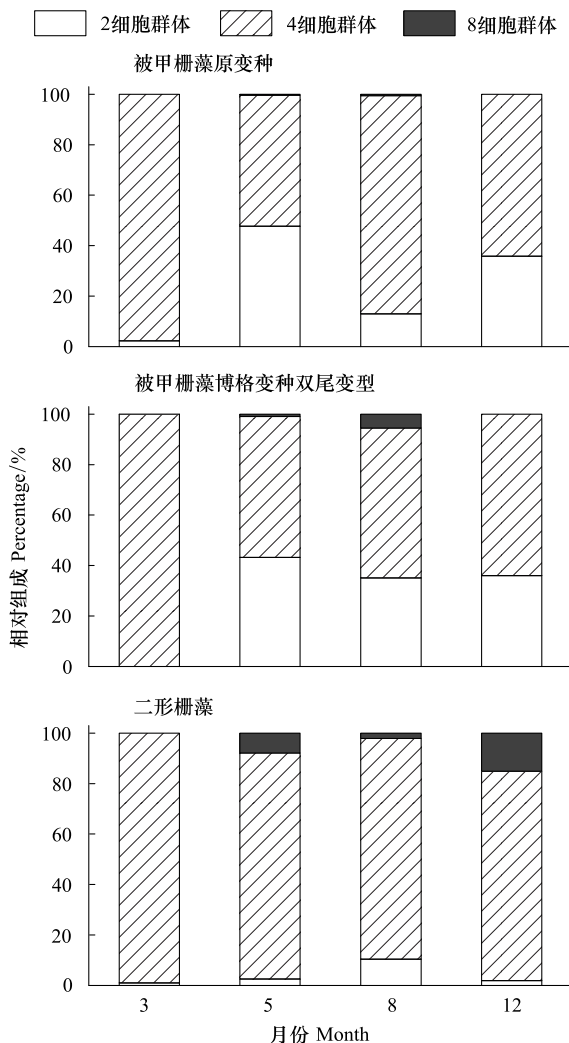


图3 常见种不同大小群体数量的相对组成

Fig.3 Relative proportion of different size colony number for common species

2.4 栅藻与绿藻、浮游植物总种群的关系

将栅藻种类丰富度与对应的绿藻和总群落种类丰富度分别进行线性回归分析,发现栅藻与绿藻和总群落种类丰富度均存在极显著意义的正相关关系(图4);将栅藻种群生物量的对数值与对应的绿藻

和总群落生物量的对数值分别进行线性回归分析,发现栅藻与绿藻和总群落生物量均存在极显著意义的正相关关系(图4)。

2.5 种类丰富度与种群生物量的时空特征

栅藻总种类丰富度的季节特征显示,丰水季节种类丰富度高于枯水季节,5月和8月的种类丰富度均为19种,高于3月的13种和12月的17种。具体到各站位种类丰富度的季节特征,多数站位的季节特征与总种类丰富度的季节特征一致,但河网中部站位易出现枯水期12月的种类数最高,3月最低,丰水期种类数居中的结果(图5)。

栅藻总种类丰富度的空间分布显示,河网中部站位的种类丰富度明显低于南北两侧的调查站位,最高值出现在珠江桥,为16种,次高值出现在外海,为15种;最低值出现在横沥,为9种,次低值出现在左滩、榄核和陈村,均为11种。然而具体到不同季节,空间分布格局存在明显差异。3月份的最高值出现在莲花山,为10种,除珠江桥和莲花山外,其它站位种类丰富度均小于4种,小塘和陈村甚至未出现栅藻物种。5月和8月的空间分布格局与总种类丰富度的空间格局基本一致,最高值均出现在珠江桥,分别为13种和12种,最低值均出现在河网中部站位。12月份的空间分布格局为西江沿线站位种类丰富度明显低于其它站位(图5)。

栅藻种群生物量的季节特征显示,丰水季节生物量明显高于枯水季节,5月和8月的生物量均值分别为0.03 mg/L和0.04 mg/L,3月和12月的生物量均值分别为0.003 mg/L和0.015 mg/L。具体到各站位种群生物量的季节特征,多数站位的季节特征与总均值的分布特征一致,只是河网中部站位易呈现季节间种群生物量差距不显著的结果(图5)。

栅藻种群生物量的空间分布显示,珠江桥的种群生物量明显高于其它站位,为0.15 mg/L,次高值出现在北滘,为0.03 mg/L;最低值出现在小榄,为0.01 mg/L,次低值出现在陈村,为0.006 mg/L,最高值和最低值相差28倍。具体到不同季节,空间分布格局与全年均值基本一致,最高值均出现在珠江桥,次高值往往出现在河网中部站位;最低值往往出现在西江沿线站位或河网中部站位(图5)。

2.6 栅藻种类丰富度和种群丰度之间的关系

栅藻种群生物量与种类丰富度的拟合曲线显示,

种类丰富度近似为种群生物量的单峰函数(图6)。

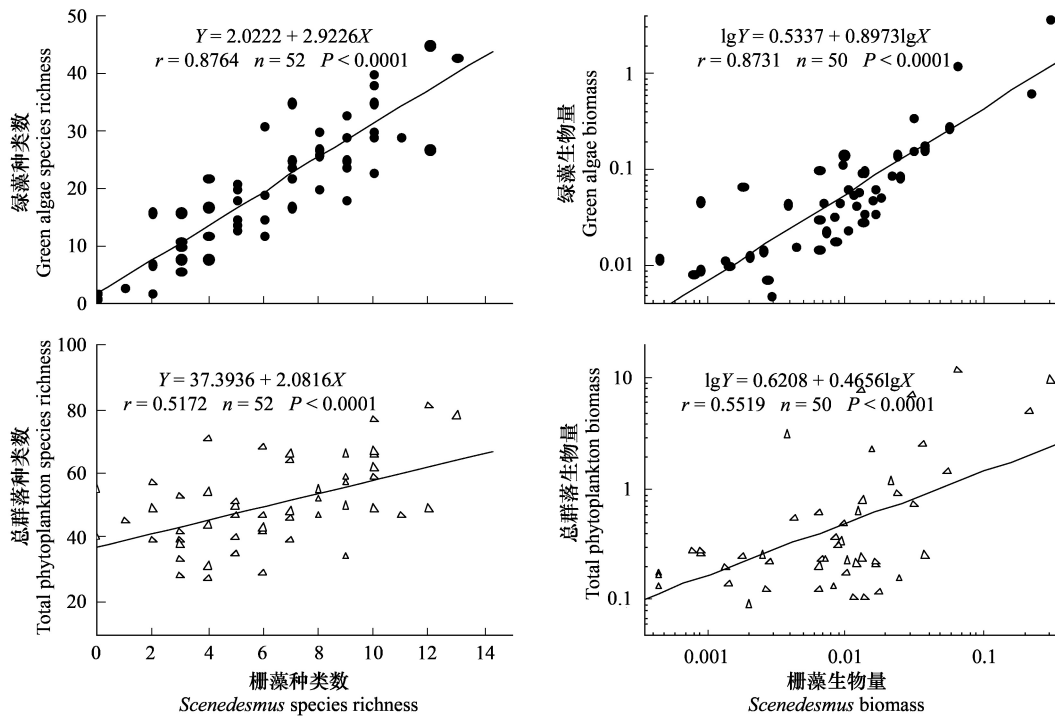


图4 栅藻与绿藻、浮游植物总种群的关系

Fig.4 Relationship between *Scenedesmus* and green algae, total phytoplankton

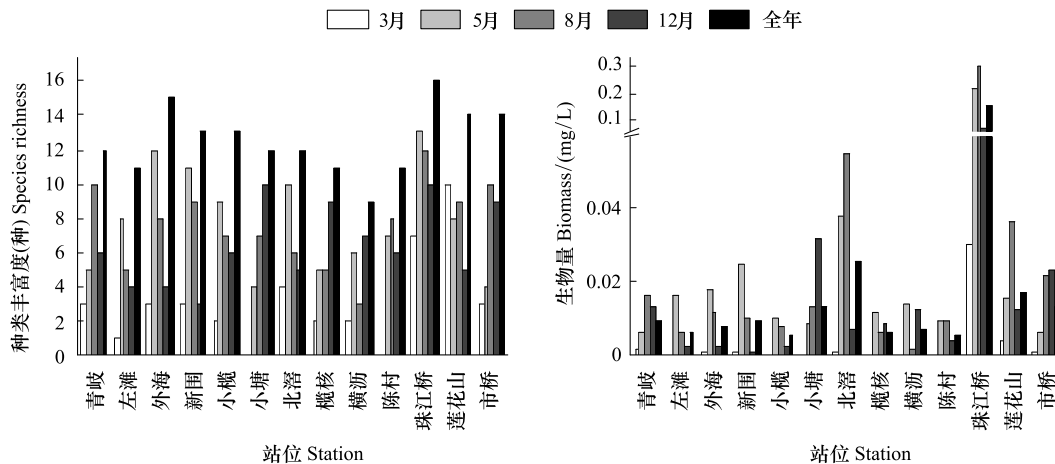


图5 栅藻种类丰富度和种群生物量的时空特征

Fig.5 Temporal and spatial pattern of species richness and population biomass for *Scenedesmus*

2.7 栅藻物种与环境因子的关系

用 Canoco 软件对出现率大于 10% 的 15 个栅藻物种的生物量数据进行去趋势对应分析 (DCA), 在所得的各特征值部分发现 4 个排序轴中梯度最大值小于 3, 因此数据分析选用线性模型中的间接梯度分析 PCA 模型, 获得栅藻物种与 13 种水环境因子的 PCA 二维降序图 (图 7)。

栅藻物种生物量分析图中, 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 (表 2); 对于环境因子来说, 前 2 个排序轴的贡献率分别为 92.20% 和 6.70%, 这说明前 2 个排序轴含有 13 种环境因子 98.9% 的信息, 所以可以用 PCA 二维降序图研究 13 种环境因子间的相互关系 (表 2)。栅藻物种生物量第一个排序轴与环境因子第一个排序轴的相关系数为 0.85; 各物种生物量与环境因子第二个排序轴的相关系数为 0.59 (表 2), 这表明

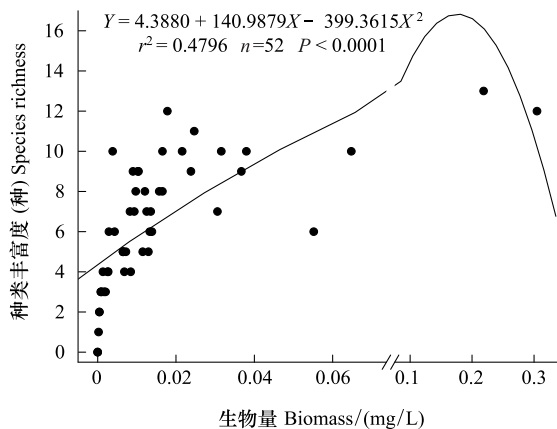


图6 栅藻种群生物量与种类丰富度的关系

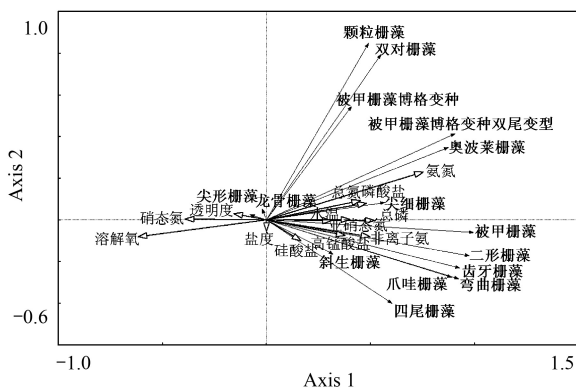
Fig. 6 Relationship between biomass and species richness of *Scenedesmus*

图7 栅藻物种生物量与环境因子的关系

Fig. 7 Relationship between *Scenedesmus* sp. and environmental factors

PCA 分析结果可以较好地解释栅藻物种生物量与环境因子之间的关系。

根据对 PCA 降维图的某种解读原则,先讨论栅藻物种间的关系。物种降维点之间越靠近,物种间的关系便越密切。从图 7 可以看出:被甲栅藻原变种、二形栅藻、齿牙栅藻、爪哇栅藻和弯曲栅藻的关系密切,奥波莱栅藻和被甲栅藻博格变种双尾变型的关系密切,被甲栅藻博格变种、双对栅藻和颗粒栅藻的关系密切,尖形栅藻和龙骨栅藻的关系密切。

根据对降维图的另一解读原则,研究环境因子与栅藻生物量的关系。首先要考虑降维图环境因子两个排序轴贡献率的差异。本文环境因子第一排序轴的方差贡献率为 92.2%,远大于第二排序轴 (6.7%),也就是说环境因子在水平轴位置的重要性远高于垂直轴的位置。即,环境因子“矢量”在第一

排序轴(而不是第二排序轴)的投影绝对值越大,该环境因子影响力越高;还有,环境因子“矢量”与物种降维点“矢量”夹角越小,它们之间正相关的程度越高;最后还要知道,如果某些环境因子降维点与栅藻物种降维点越靠近,该环境因子与相邻的物种间的关系越密切。根据上述解读原则,从图 7 可知:1) 在众多的环境因子中,溶解氧和氨氮含量的变化对各栅藻物种生物量的增减影响最大;其次非离子氨、总磷、总氮、磷酸盐和硝态氮等因子对生物量的影响也较为明显;水温“矢量”在第一排序轴的投影值虽然不太大,但它与多数栅藻物种呈正相关、且对研究栅藻种类丰富度和生物量的季节性差异时明显相关,所以也是重要的环境因子。透明度“矢量”在第一排序轴的投影值更小些,但它与多数栅藻物种呈负相关;对解析栅藻种类丰富度的季节特征有帮助;2) 水温升高以及除硝态氮以外的营养盐含量升高有利于其它栅藻物种生物量的增加,却不利于尖形栅藻和龙骨栅藻生物量的变大;3) 透明度、溶解氧和硝态氮的升高不利于大部分栅藻物种生物量的增加,但有利于尖形栅藻和龙骨栅藻生物量的增加;4) 盐度的变化对栅藻生物量多寡影响不大;5) 环境因子与栅藻物种之间的关系还有多种解读,可以根据不同的研究需要进行分析讨论,因篇幅所限本文不再展开。

3 讨论

研究结果显示,调查水域栅藻物种组成丰富,分析原因在于:(1)尽管栅藻主要分布于静水水体,但是珠三角河网水域是珠江水系(包括西江、北江和东江等支流)入注南海的必经之地,该水域基本容纳了整个珠江流域的代表性种类,流域中的静水水体如水库、湖泊、沟渠、水塘等通过与干流贯通使得栅藻物种汇集到河网水域,从而增加了物种组成的多样性。Reavie 等^[20]对美国三条大河(密西西比河、密苏里河和俄亥俄河)的调查也发现,栅藻物种组成丰富,共记录栅藻 23 种,这与在河网水域的调查结果相近。因此,来自上游江河干流的外源供给是河网水域栅藻物种丰富的先决条件;(2)以往研究表明,栅藻多为营养水体的指示物种^[21-22],而河网水域营养盐含量丰富^[18],有利于种类繁多的栅藻存在和生长。以最常见的被甲栅藻为例,其在相对寡营养的

西江下游江段的全年出现率为 71.60%,且无作为优势种的记录^[23];而河网水域被甲栅藻的出现率为 90.38%,且在 5 月份的 4 个站位达到优势种标准,这直接反映出水体营养状况对栅藻生长的重要性。因此,营养供给充沛是种类繁多的栅藻赖以生存和生长的保障条件。但是,由于栅藻更加适宜于相对平静的水体^[24-26],加上来自其它优势藻种^[23,27]的竞争抑制,使得栅藻种群生物量一直处于劣势。此外,本文研究发现,栅藻种群与绿藻类群和总浮游植物群落均存在极显著正相关关系,表明栅藻在一定程度上可反映绿藻类群和浮游植物总种群的动态变化。

从不同栅藻物种的生态特征数据来看,栅藻物种生物量及贡献率与出现率关系密切,存在一定的正相关。推测,不同栅藻物种间的生态差异很可能与形态特征差异存在一定的关联。调查水域出现率高且生物量贡献较大的物种仅 3 种,其中被甲栅藻原变种和被甲栅藻博格变种双尾变型的共同点为群体的外侧细胞均具刺状结构^[1-2],除起增加浮力的作用外,还可以减小摄食压力。Mayeli 等^[28]的研究表明,具刺的四尾栅藻对小型浮游动物摄食的防御能力强于无刺的尖锐栅藻(*S. acutus*)。具刺栅藻物种被发现更容易在自然水体中占据优势地位^[10,29-30]也说明了这一点。其二,这两个物种的细胞相对较小(表 1),具有较高的表面积/体积比,有助于更好的营养吸收^[31]。其三,从不同大小群体数的相对组成上看,原变种和双尾变型的 2 细胞群体数与 4 细胞群体数相当,这种机动的群体组成机制有助于这两种栅藻与其它群体组成相对固定的栅藻共存时,更好地适应水体环境,更快地吸收营养和生长繁殖。由此细胞形态特征和群体组成特征的相辅相成使这两个物种对环境的适应能力优于其它栅藻物种,因而出现率和丰度均较高。尽管二形栅藻无刺状结构,但是其细胞个体较大,细胞上下两端渐尖^[1-2],且在群体组成中存在一定比例的 8 细胞群体,这些特征均有助于增强其在水体中的浮力和减小摄食压力;其在生物量贡献方面逊于被甲栅藻原变种和双尾变型很可能源于刺状结构的缺失。尖细栅藻、奥波莱栅藻和斜生栅藻同样具有较高出现率,来自优势栅藻物种的生存竞争很可能是导致其生物量贡献较低的原因。其它 18 种栅藻的出现率和丰度贡献率均较低,且多出现在水温较高的丰水季节,很可能

与其在水源地的分布状况及自身的竞争力有关。国际上的其它河流不乏有关栅藻物种的发生^[29-30]及其在群落中优势程度^[10,32]的记录,与本文结果不尽相同,这直接说明栅藻种群及分布具有明显的区域特征,不同调查水域的理化环境特征在栅藻种群组成及生态变化的调控方面可能发挥更重要的作用。

基于栅藻物种组成相似性的站位间聚类结果,枯水季节各站位的栅藻组成主要受上游珠江干流物种随径流自然分配的影响,因此物种组成相似性高;而丰水季节除受径流支配的影响外,个别站位邻近小水体对物种组成的贡献也发挥相当作用,因此站位间的相似性小。河网中部个别站位(如北滘)的生物量明显高于周边站位很可能说明此调查站位周边水域特征对栅藻种群的空间分布也发挥一定的作用。

从栅藻种类丰富度的季节分布特征看,丰水期的种类丰富度明显高于枯水期。PCA 降维图可知,温度与多数栅藻物种的生物量呈正相关,Wu 等^[33]对四尾栅藻的研究表明,该种对低温的耐受能力较差。Wu 等^[32]在德国 Kielstau 江流域的研究也发现,二形栅藻对水温比较敏感,具有良好的指示作用。此外,PCA 结果也显示,大多数栅藻物种与透明度呈显著负相关关系,这主要是由于丰水期径流的增大导致了栅藻物种外源注入的增加,使种类丰富度升高的缘故,而径流增大的同时使水体搅动更为剧烈,水体浑浊度增大,透明度降低。受径流影响相对较小的河网中部站位的种类丰富度的季节特征与其它站位明显不同也反映出径流影响的重要作用。因此,径流量小是导致枯水期 3 月和 12 月的种类丰富度低于丰水期 5 月和 8 月的关键因素;而低温是导致 3 月的种类丰富度低于同为枯水期但水温略高的 12 月的关键因素。从空间分布上看,全年栅藻总种类丰富度的空间分布呈现河网中部站位低于外侧站位的特征,主要原因在于河网中部站位的水流交换相对较弱,受径流所引起的藻种外源注入作用小于外侧邻近干流的站位,因此种类丰富度较低。然而,具体到不同季节,空间分布格局不尽相同。丰水期的空间分布格局与总种类丰富度一致,而枯水期则表现为西江沿线站位种类丰富度明显偏低,这种季节性的反差一方面说明径流引起的外源供给和低温对栅藻多样性的影响,另一方面西江沿线站位的相

对寡营养也是重要因素,因为3月和12月同属低温枯水季节,12月份由于水温略高,河网中部站位的种类丰富度较3月份有明显升高,但是西江沿线站位种类丰富度与3月份差异不大,由此认为是水体寡营养造成的。Kocum 和 Sutcu 的研究^[22]也发现,富营养化程度越高的调查站位,栅藻的出现频率越高。因此,径流和水温是影响栅藻种类丰富度季节变动的关键因素;此外,径流也是影响栅藻总种类丰富度空间分布格局的关键因素,水温和营养盐是影响不同季节栅藻种类丰富度的空间格局的重要因素。

栅藻种群生物量的季节分布特征与种类丰富度一致,丰水期明显高于枯水期,其它江河的研究结果^[34-35]也表明,栅藻易在丰水季节成为优势种。我们的结果显示丰水季节种群生物量高于枯水季节,被甲栅藻在5月份的四个站位成为优势种也表明丰水季节有利于栅藻种群生物量的增加。除了得益于径流增大带来的外源补给外,适宜的水温和营养盐补充也是重要因素。此外,枯水季节栅藻的生长还会受到低温的抑制,水温略高的12月份生物量高于3月份也说明了这一点。从空间分布上看,全年均值的空间格局与各季节基本一致,均表现为珠江桥站位的栅藻生物量明显高于其它站位,主要与该站位营养盐含量极度丰富有关,PCA 分析结果中大多数栅藻物种与营养盐存在正相关关系也说明了这一点。以往的研究结果^[36-38]也表明,栅藻对水体中营养盐的变动比较敏感,种群生物量与营养盐含量呈正相关关系。此外,珠江桥位于广州市内江段,水体波动程度小于其它江段,也有助于栅藻丰度的增长。尽管珠江桥站位的盐度明显高于远离广州的站位,但是 El-Sayed 等^[39]的研究结果显示,一定范围内的盐度浓度对栅藻的生长没有影响。但是,当盐度超过一定范围之后,势必对淡水藻种栅藻的生长产生负面影响,莲花山的盐度超出珠江桥近5倍,尽管两个站位的营养盐含量处于同一水平,但是莲花山栅藻生物量仅为珠江桥的九分之一。综上,径流和水温是决定栅藻种群生物量季节变动的关键因素,而营养盐、水体稳定性和盐度是决定栅藻生物量空间分布格局的关键因素。

栅藻生物量与种类丰富度的关系基本符合 Irigoien 等^[13]提出的单峰模型,且偏重于单峰模型的上升区,此结果也丰富了浮游植物多样性单峰模型

的分级特征和区域特征。

致谢:现场样本采集工作由庞世勋副研究员、研究生李秀丽和赵李娜协助完成。广东工业大学余煜棉教授对统计分析给予指导,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

References:

- [1] Lu K X. Fishery Resources of the Pearl River System. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1990: 27-39.
- [2] Hu H J, Wei Y X. The Freshwater Algae of China-Systematics, Taxonomy and Ecology. Beijing: Science Press, 2006: 450-459.
- [3] Liu G X, Hu Z Y. Flora Algarum Sinicarum Aquae Dulcis XV, Chlorophyta, Chlorococcales (II), Tetrasporales, Dichotomosiphonales, Cladophorales. Beijing: Science Press, 2012: 49-86.
- [4] Lin Q, Lin J D. Effects of nitrogen source and concentration on biomass and oil production of a *Scenedesmus rubescens* like microalga. Bioresource Technology, 2011, 102(2): 1615-1621.
- [5] Ruangsomboon S, Ganmanee M, Choochote S. Effects of different nitrogen, phosphorus, and iron concentrations and salinity on lipid production in newly isolated strain of the tropical green microalga, *Scenedesmus dimorphus* KMITL. Journal of Applied Phycology, 2013, 25(3): 867-874.
- [6] Bao Y P, Huang Q Y, Li Y Y, Li N, He T D, Feng C H. Prediction of nitrobenzene toxicity to the algae (*Scenedesmus obliquus*) by quantitative structure-toxicity relationship (QSTR) models with quantum chemical descriptors. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2012, 33(1): 39-45.
- [7] Zhang J Y, Ding T D, Zhang C L. Biosorption and toxicity responses to arsenite (As[III]) in *Scenedesmus quadricauda*. Chemosphere, 2013, 92(9): 1077-1084.
- [8] Dunker S, Jakob T, Wilhelm C. Contrasting effects of the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* on the growth and physiology of two green algae, *Oocystis marsonii* and *Scenedesmus obliquus*, revealed by flow cytometry. Freshwater Biology, 2013, 58(8): 1573-1587.
- [9] Guo S L, Zhao X Q, Tang Y, Wan C, Alam M A, Ho S H, Bai F W, Chang J S. Establishment of an efficient genetic transformation system in *Scenedesmus obliquus*. Journal of Biotechnology, 2013, 163(1): 61-68.
- [10] Gameiro C, Brotas V. Patterns of phytoplankton variability in the Tagus Estuary (Portugal). Estuaries and Coasts, 2010, 33(2): 311-323.
- [11] Sin Y, Hyun B, Bach Q D, Yang S, Park C. Phytoplankton size and taxonomic composition in a temperate estuary influenced by monsoon. Estuaries and Coasts, 2012, 35(3): 839-852.
- [12] Hosmani S P. Diversity of *Scenedesmus* in freshwater lakes of Mysore. ZENITH International Journal of Multidisciplinary Research, 2013, 3(3): 214-221.
- [13] Irigoien X, Huisman J, Harris R P. Global biodiversity patterns of marine phytoplankton and zooplankton. Nature, 2004, 429: 863-867.
- [14] Wang C, Huang C J, Du H. Seasonal variation of *Chaetoceros* community in Zhelin Bay of eastern Guangdong. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(1): 237-245.
- [15] Wang C, Huang C J, Du H. Seasonal trait of *Rhizosolenia* community in Zhelin Bay of eastern Guangdong. Acta Ecologica

- Sinica, 2008, 28(2): 559-569.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Wang C, Li X H, Lai Z N, Zeng Y Y, Gao Y, Liu Q F, Yang W L. Temporal and spatial pattern of the phytoplankton biomass in the Pearl River Delta. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5835-5847.
- [19] 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). Qulu, Finland: Oulun Yliopistopaino, 2000: 184-196.
- [20] Reavie E D, Jicha T M, Angradi T R, Bolgrien D W, Hill B H. Algal assemblages for large river monitoring: Comparison among biovolume, absolute and relative abundance metrics. Ecological Indicators, 2010, 10(2): 167-177.
- [21] Zhao Z H, Mi T F, Xia L L, Yan W M, Jiang Y, Gao Y Z. Understanding the patterns and mechanisms of urban water ecosystem degradation: phytoplankton community structure and water quality in the Qinhuai River, Nanjing City, China. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(7): 5003-5012.
- [22] Kocum E, Sutcu A. Analysis of variations in phytoplankton community size-structure along a coastal trophic gradient. Journal of Coastal Research, 2013, doi: 10.2112/JCOASTRES-D-12-00045.1.
- [23] Wang C, Lai Z N, Li X H, Gao Y, Li Y F, Yu Y M. Annual variation pattern of phytoplankton community at the downstream of Xijiang River. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(14): 4398-4408.
- [24] Hondzo M M, Kapur A, Lembi C A. The effect of small-scale fluid motion on the green alga *Scenedesmus quadricauda*. Hydrobiologia, 1998, 364(2/3): 225-235.
- [25] Bertrand C, Franquet E, Chomérat N, Cazaubon A. An approach to the Intermediate Disturbance Hypothesis at the landscape scale: the effects of hydrodynamic disturbance on phytoplankton communities. Archiv für Hydrobiologie, 2004, 161(3): 351-369.
- [26] Li F P, Zhang H P, Zhu Y P, Xiao Y H, Chen L. Effect of flow velocity on phytoplankton biomass and composition in a freshwater lake. Science of the Total Environment, 2013, 447: 64-71.
- [27] Wang C, Lai Z N, Li Y F, Li X H, Lek S, Hong Y, Tan X C, Li J. Population ecology of *Aulacoseira granulata* in Xijiang River. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(15): 4793-4802.
- [28] Mayeli S M, Nandini S, Sarma S S S. The efficacy of *Scenedesmus* morphology as a defense mechanism against grazing by selected species of rotifers and cladocerans. Aquatic Ecology, 2004, 38(4): 515-524.
- [29] 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.
- [30] Townsend S A, Przybylska M, Miloshevs 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.
- [31] Tilman D, Kilham P. Sinking in freshwater phytoplankton: some ecological implications of cell nutrient status and physical mixing processes. Limnology and Oceanography, 1976, 21(3): 409-417.
- [32] 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.
- [33] Wu Z X, Song L R, Li R H. Different tolerances and responses to low temperature and darkness between waterbloom forming cyanobacterium *Microcystis* and a green alga *Scenedesmus*. Hydrobiologia, 2008, 596(1): 47-55.
- [34] Carvajal-Chitty H I. Some notes about the Intermediate Disturbance Hypothesis and its effects on the phytoplankton of the middle Orinoco River. Hydrobiologia, 1993, 249(1/3): 117-124.
- [35] Mihaljević M, Špoljarić D, Stević F, Cvijanović V, Kutuzović B H. The influence of extreme floods from the River Danube in 2006 on phytoplankton communities in a floodplain lake: shift to a clear state. Limnologia, 2010, 40(3): 260-268.
- [36] Lüring M, Geest G, Scheffer M. Importance of nutrient competition and allelopathic effects in suppression of the green alga *Scenedesmus obliquus* by the macrophytes *Chara*, *Elodea* and *Myriophyllum*. Hydrobiologia, 2006, 556(1): 209-220.
- [37] Zhu W, Wan L, Zhao L F. Effect of nutrient level on phytoplankton community structure in different water bodies. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(1): 32-39.
- [38] Tian C, Lu X T, Pei H Y, Hu W R, Xie J. Seasonal dynamics of phytoplankton and its relationship with the environmental factors in Dongping Lake, China. Environmental Monitoring Assessment, 2013, 185(3): 2627-2645.
- [39] El-Sayed A B, El-Fouly M M, Abou El-Nour E A A. Immobilized microalga *Scenedesmus* sp. for biological desalination of Red Sea water: I. effect on growth. Nature and Science, 2010, 8(9): 69-76.

参考文献:

- [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] 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: 650-659.
- [3] 刘国祥, 胡征宇. 中国淡水藻志, 第十五卷, 绿藻门, 绿球藻目(下), 四胞藻目、叉管藻目、刚毛藻目. 北京: 科学出版社, 2012: 49-86.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [18] 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.
- [23] 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.
- [27] 王超, 赖子尼, 李跃飞, 李新辉, Lek S, 洪颐, 谭细畅, 李捷. 西江颗粒直链藻种群生态特征. 生态学报, 2012, 32(15): 4793-4802.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.7 Apr., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The 5000-year climate change of northeastern Qinghai-Tibetan Plateau and historical ecology of Zoige wetlands HE Yixin, WU Ning, ZHU Qiu'an, et al (1615)
- Altitudinal distribution rule of *Picea schrenkiana* forest's soil organic carbon and its influencing factors Aminem ELI, CHANG Shunli, ZHANG Yutao, et al (1626)

Autecology & Fundamentals

- Daily stem radial variation of *Pinus koraiensis* and its response to meteorological parameters in Xiaoxing'an mountain LI Xinghuan, LIU Ruipeng, MAO Zijun, et al (1635)
- Effects of logging residues on surface soil biochemical properties and enzymatic activity WU Bobo, GUO Jianfen, WU Junjun, et al (1645)
- Characteristics of soil macroaggregates under typical forests in Pangquangou Nature Reserve BAI Xiumei, HAN Youzhi, GUO Hanqing (1654)
- Modeling tree crown structure of Simao pine (*Pinus kesiya* var. *langbianensis*) natural forest OU Guanglong, XIAO Yifa, WANG Junfeng, et al (1663)
- Influence of magnesium deficiency and excess on chlorophyll fluorescence characteristics of Newhall navel orange leaves LING Lili, HUANG Yi, PENG Liangzhi, et al (1672)
- Seed foraging and dispersal of Chinese yew (*Taxus chinensis* var. *mairei*) by frugivorous birds within patchy habitats LI Ning, WANG Zheng, LU Changhu, et al (1681)
- Interactions between heavy metal lead and two freshwater algae LIU Lu, YAN Hao, LI Cheng, et al (1690)
- Annual variations of the primary productivity and its size-fractioned structure in culture ponds of *Apostichopus japonicus* Selenka JIANG Senhao, ZHOU Yibing, TANG Boping, et al (1698)
- Growth and photosynthetic activity of *Microcystis* colonies after gut passage through silver carp and bighead carp WANG Yinping, GU Xiaohong, ZENG Qingfei, et al (1707)
- Contents of two coumarins in *Ipomoea cairica* and their effects on *Pomacea canaliculata*, *Orzya sativa*, and *Echinochloa crusgalli* YOU Changyan, YANG Yu, HU Fei, et al (1716)

Population, Community and Ecosystem

- Population and habitat status of Asian elephants (*Elephas maximus*) in Mengla Sub-reserve of Xishuangbanna National Nature Reserve, Yunnan of China LIN Liu, JIN Yanfei, CHEN Dekun, et al (1725)
- Seasonal changes of functional guilds of fish community in Laizhou Bay, East China LI Fan, XU Bingqing, MA Yuanqing, et al (1736)
- Effect of long-term fertilization pattern on weed community diversity in wheat field JIANG Min, SHEN Mingxing, SHEN Xinpeng, et al (1746)
- Ecological process of water transformation in furrow and ridge mulching system in oat field under extreme drought scenario ZHOU Hong, ZHANG Hengjia, MO Fei, et al (1757)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Simulations and analysis on the effects of landscape pattern change on flood and low flow based on SWAT model LIN Bingqing, CHEN Xingwei, CHEN Ying, et al (1772)
- Phenological variation of alpine grasses (Gramineae) in the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau, China during the last 20 years XU Weixin, XIN Yuanchun, ZHANG Juan, et al (1781)
- Landscape aesthetics in different areas of Lijiang City GUO Xianhua, ZHAO Qianjun, CUI Shenghui, et al (1794)
- Temporal and spatial pattern of *Scenedesmus* in the river web of the Pearl River Delta, China WANG Chao, LI Xinhui, LAI Zini, et al (1800)

- Spatiotemporal dynamics of bacterial abundance and related environmental parameters in Lake Bosten WANG Bowen, TANG Xiangming, GAO Guang, et al (1812)
- Scale domain recognition for land use spatial fractal feature based on genetic algorithm WU Hao, LI Yan, SHI Wenzhong, et al (1822)
- Relationships of stable carbon isotope of *Abies faxoniana* tree-rings to climate in sub-alpine forest in Western Sichuan JIN Xiang, XU Qing, LIU Shirong, et al (1831)
- An exploratory spatial data analysis-based investigation of the hot spots and variability of *Ommastrephes bartramii* fishery resources in the northwestern Pacific Ocean FENG Yongjiu, CHEN Xinjun, YANG Mingxia, et al (1841)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- Spatial differentiation research of non-use value WTP based on the residents' ecological cognition: taking the sanjiang plain as a case GAO Qin, AO Changlin, CHEN Hongguang, et al (1851)
- Contamination characteristics in surface water and coastal groundwater of Hunhe River CUI Jian, DU Jizhong, WANG Xiaoguang (1860)
- Social ecological system and vulnerability driving mechanism analysis YU Zhongyuan, LI Bo, ZHANG Xinshi (1870)
- Research Notes**
- Effects of iso-osmotic $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ and NaCl stress on growth and physiological characteristics of cucumber seedlings ZHOU Heng, GUO Shirong, SHAO Huijuan, et al (1880)
- View Point**
- The discussion about the designation and content of ecological conservation and construction SHEN Guofang (1891)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 魏辅文

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 7 期 (2014 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 7 (April, 2014)

| | | | |
|---------------|--|-----------------|---|
| 编 辑 | 《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn | Edited by | Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn |
| 主 编 | 王如松 | Editor-in-chief | WANG Rusong |
| 主 管 | 中国科学技术协会 | Supervised by | China Association for Science and Technology |
| 主 办 | 中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 | Sponsored by | Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China |
| 出 版 | 科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 | Published by | Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China |
| 印 刷 | 北京北林印刷厂 | Printed by | Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China |
| 发 行 | 科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@ cspg. net | Distributed by | Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@ cspg. net |
| 订 购 | 全国各地邮局 | Domestic | All Local Post Offices in China |
| 国外发行 | 中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044 | Foreign | China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China |
| 广告经营 许 可 证 | 京海工商广字第 8013 号 | | |



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元