

文章编号: 1674-5566(2021)01-0103-10

DOI:10.12024/jso.20191202886

## 苏州城区河道浮游植物功能群演替特征及其对环境因子的响应

马 婕<sup>1,2,3</sup>, 申利亚<sup>1,2,3</sup>, 何培民<sup>4,5</sup>, 田潇岑<sup>1,2,3</sup>, 陈立婧<sup>1,2,3</sup>

(1. 上海海洋大学 水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 上海水产养殖工程技术研究中心, 上海 201306; 3. 上海海洋大学 水产动物遗传育种中心上海市协同创新中心, 上海 201306; 4. 上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306; 5. 上海海洋大学 水域环境生态上海高校工程研究中心, 上海 201306)

**摘 要:** 苏州作为长江三角洲地区重要的城市之一, 近年来其城区河道富营养化问题日趋严重。为探讨苏州城区河道浮游植物功能群的结构组成、周年演替以及其对环境因子的响应, 于 2018 年对苏州城区河道进行每两月一次的调查分析。结果表明, 全年共鉴定出浮游植物 7 门 85 属 209 种(包括变种和变型), 可划分为 29 个功能群, 其中 19 个(B、C、D、G、H1、J、Lo、M、MP、P、S1、S2、T、TC、W1、X1、X2、Y、Z)为该区的优势功能群。浮游植物功能群呈现出 B + C + D + H1 → W1 + H1 → P + G + H1 → M + S1 + H1 的周年演替特征, 功能群 H1 在全年占据绝对优势。RDA 分析表明, 水温、总氮、总磷和电导率是影响该水域浮游植物功能群变化的主要环境因子。

**关键词:** 苏州; 城区河道; 浮游植物功能群; 周年演替; 环境因子

**中图分类号:** X 171 **文献标志码:** A

浮游植物是水生生态系统的生产者, 是水体生态系统食物链中最重要的一环, 不仅在物质循环和能量流动中起重要作用, 而且可作为水质净化程度和生态修复水平的指示生物<sup>[1-2]</sup>。浮游植物群落结构在非生物因素和生物因素的单独或共同作用下, 会产生明显的季节演替现象, 从而表征水环境的状况<sup>[3]</sup>。其中, 水温<sup>[4]</sup>、光照<sup>[5]</sup>、氮磷营养盐<sup>[6]</sup>等是影响浮游植物分布变化的主要非生物因素, 浮游动物的摄食<sup>[7]</sup>、滤食性鱼类的放养<sup>[8]</sup>、底栖软体动物的数量<sup>[9]</sup>、水生高等植物的生长<sup>[9]</sup>等均会改变浮游植物群落结构。因此, 探究浮游植物群落结构的变化以及与水环境因子的关系可以对水体保护提供重要参考。近年来, 在传统的浮游植物分类方法鉴定的基础上, REYNOLDS 等<sup>[10]</sup>和 PADISÁK 等<sup>[11]</sup>提出了相对完整的浮游植物功能群理论, 主要内容是将相同生态环境下能共同生长的浮游植物归为同一功能群, 以便最大限度地揭示出浮游植物群落结构与水体环境的动态关系, 更直接地阐述生境变化

对浮游植物群落结构变化的影响, 已成为国内外学者<sup>[12-15]</sup>当前研究的热点。目前对于浮游植物功能群分类方法的应用研究多集中于水库<sup>[12]</sup>、河流<sup>[13]</sup>和湖泊<sup>[14-15]</sup>等水域, 而有关城市河道水体的浮游植物功能群报道很少。

苏州作为长江三角洲地区重要的中心城市之一, 是典型的江南水网和高密度人群地区。其地处亚热带季风气候区, 市内河道众多, 河湖串通, 河道水流流向同时受到地形支配和人为因素两方面的影响, 水情复杂<sup>[16-18]</sup>。早期针对苏州河道水体污染的生态监测和综合治理研究区域较小且多注重水质指标的改善, 仅有万蕾等<sup>[19]</sup>运用传统群落分类方法对苏州古城区重污染河道苗家河的浮游植物消长规律做了初探; 另外, 苏明玉等<sup>[20]</sup>对苏州城区内 27 个重点河流监测点的水质指标进行了研究。近年来, 经济高度发展和人口不断增长对苏州城区河道造成很大的污染, 严重危害到人类用水安全; 因此, 围绕苏州水生态问题进行的生态监测受到苏州市政府的重点关

收稿日期: 2019-12-24 修回日期: 2020-03-17

基金项目: “十三五”水专项-苏州区域水质提升与水生态安全保障技术及综合示范项目(2017ZX07205)

作者简介: 马 婕(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水生生物学。E-mail: 527752279@qq.com

通信作者: 陈立婧, E-mail: ljchen@shou.edu.cn

注。本研究于2018年对苏州城区河道进行每两月一次的定点采样调查研究,运用浮游植物功能群分类方法,对其进行功能群划分,结合水文和水质参数,分析浮游植物功能群的周年演替规律及其与水环境因子的关系,为城区河道生态健康维系提供基础资料,以期为深入了解高度人为干扰的城市河道水体生态系统结构及功能提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点位和采样频率

本研究依据苏州城区的水系图及前期调查研究,尽可能以最少的监测点获取足够有代表性的环境信息,选择在重要河流的支流或交汇处,以及河床和水流状况较为稳定、水面宽阔、无浅滩的顺直河段,布设监测点位。在苏州城区划分出的8个水体片区,共设置23个监测点位,具体为城北片区(监测点位1和2)、山塘片区(监测点位3、4、5和6)、古城西北片区(监测点位7、8和9)、古城东北片区(监测点位10、11和12)、干将沿线区(监测点位13和14)、古城南片区(监测点位15、16、17、18和19)、城西片区(监测点位20、21和22)以及城南片区(监测点位23),具体见图1。河道多为受人类活动影响较大的居民污染型河道,水体总体上自北向南流动,首先流经城北片区,随后经古城内的几个片区,最终流入下游的城南片区。2018年进行每两月一次定点采样,用于水质及浮游植物的样品分析,以此全面掌握河道在各区及整体的表现变化过程和发展趋势。

### 1.2 样品的采集与测定

浮游植物样品采集及物种鉴定:使用5 L有机玻璃柱状采水器采集水样,河道水深约3 m,采样深度位于河道表层的0.5 m处。浮游植物共采集10 L混匀,取1 L装入塑料标本瓶中,立即加入4%甲醛溶液进行固定,带回实验室将水样分别倒入室内分液漏斗中,并加入10~15 mL鲁哥氏碘液静置、沉淀48 h,用虹吸法弃去大量上清液,浓缩至50 mL于血清瓶中保存。样品在光学显微镜(OlympusCX21,10×40倍)下进行种类鉴定和细胞计数,物种鉴定主要依据文献[21-22]。

环境因子的测定:水深(Depth)采用Hondex声纳测深仪,透明度(SD)用萨氏盘,水温(WT)、

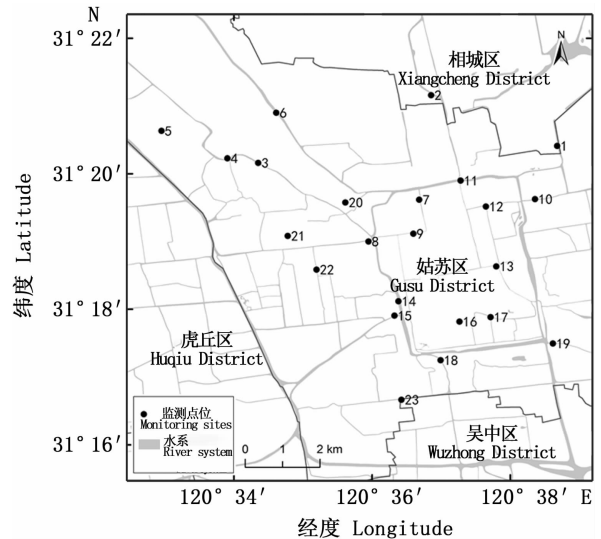


图1 苏州城区河道监测点位  
Fig. 1 Monitoring sites in the urban river courses of Suzhou City

溶解氧(DO)、pH、电导率(Ec)采用HACH便携式多参数水质分析仪进行现场测定。另取500 mL水样,带回实验室进行总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)等指标的测定。测定方法标准参照《水和废水监测分析方法》<sup>[23]</sup>,总氮(TN):碱性过硫酸钾氧化紫外分光光度法;总磷(TP):钼酸铵分光光度法;氨氮(NH<sub>3</sub>-N):纳氏试剂分光光度法。

### 1.3 数据处理与分析

浮游植物生物量根据每种浮游植物的平均湿质量换算而成,单位为mg/L<sup>[24]</sup>。浮游植物功能群生物量通过该功能群中各代表性藻类(属/种)的生物量相加得出<sup>[25-26]</sup>。

浮游植物功能群的划分依据REYNOLDS等<sup>[10]</sup>和PADISÁK等<sup>[11]</sup>的研究。将划分后的功能群按生物量进行筛选和排序,采样点相对生物量>20%的功能群定义为优势功能群<sup>[27]</sup>。

采用SPSS 24.0软件进行不同月份间环境因子的单因素方差分析(ANOVA)。浮游植物功能群和环境因子之间的关系采用R 3.4.4软件进行具体分析,首先需要对筛选后的功能群生物量和环境因子进行lg(x+1)数据标准化转换,采用去趋势对应分析法(DCA)对浮游植物功能群数据进行分析,以确定应采用线性排序或单峰排序方法,采用蒙特卡罗模拟方法,通过RDA分析,验证环境因子在解释浮游植物功能群数据时的重要意义<sup>[28]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 苏州城区河道水环境因子特征

苏州城区河道水环境因子的月际变化如表 1 所示,其中水深、总磷和氨氮质量浓度各月份之间无显著性差异( $P > 0.05$ ),溶解氧质量浓度各月份之间呈现出一定的差异性( $P < 0.05$ ),透明

度、水温、pH、电导率、总氮质量浓度和氮磷比各月份差异性极显著( $P < 0.01$ )。河道透明度为 0.11 ~ 0.90 m,最高值在 1 月出现,最低值在 5 月出现。水温作为重要的环境因子之一,各月份之间差异性最明显,1 月低至 4.7 °C,7 月高达 35.0 °C。氮磷营养盐含量全年均处于较高水平。

表 1 苏州城区河道环境因子的月际变化

Tab. 1 Monthly variations of environmental factors in the urban river courses of Suzhou City

环境因子 Environmental factors	1 月 Jan.	3 月 Mar.	5 月 May	7 月 Jul.	9 月 Sep.	11 月 Nov.
水深 Depth/m	2.2 ± 0.7 <sup>a</sup>	2.1 ± 0.5 <sup>a</sup>	1.7 ± 0.8 <sup>a</sup>	1.9 ± 0.7 <sup>a</sup>	1.9 ± 0.2 <sup>a</sup>	1.8 ± 0.6 <sup>a</sup>
总磷 TP/(mg/L)	0.33 ± 0.42 <sup>a</sup>	0.26 ± 0.13 <sup>a</sup>	0.36 ± 0.30 <sup>a</sup>	0.25 ± 0.10 <sup>a</sup>	0.41 ± 0.12 <sup>a</sup>	0.25 ± 0.23 <sup>a</sup>
氨氮 NH <sub>3</sub> -N/(mg/L)	2.37 ± 2.34 <sup>a</sup>	1.94 ± 1.36 <sup>a</sup>	3.09 ± 4.03 <sup>a</sup>	2.07 ± 2.26 <sup>a</sup>	1.48 ± 1.71 <sup>a</sup>	1.77 ± 1.17 <sup>a</sup>
溶解氧 DO/(mg/L)	7.91 ± 2.83 <sup>a</sup>	7.87 ± 2.06 <sup>a</sup>	5.55 ± 4.31 <sup>b</sup>	7.31 ± 5.41 <sup>a</sup>	4.63 ± 1.04 <sup>b</sup>	6.90 ± 0.74 <sup>a</sup>
透明度 SD/m	0.53 ± 0.18 <sup>a</sup>	0.45 ± 0.13 <sup>b</sup>	0.41 ± 0.17 <sup>bc</sup>	0.39 ± 0.12 <sup>bc</sup>	0.35 ± 0.06 <sup>c</sup>	0.43 ± 0.07 <sup>b</sup>
水温 WT/°C	5.87 ± 0.91 <sup>f</sup>	14.33 ± 0.88 <sup>c</sup>	23.39 ± 0.55 <sup>c</sup>	30.81 ± 1.25 <sup>a</sup>	28.14 ± 0.85 <sup>b</sup>	15.71 ± 0.54 <sup>d</sup>
pH	8.54 ± 0.47 <sup>b</sup>	8.20 ± 0.53 <sup>b</sup>	7.63 ± 0.70 <sup>c</sup>	9.17 ± 1.26 <sup>a</sup>	7.67 ± 0.09 <sup>c</sup>	7.50 ± 0.17 <sup>c</sup>
电导率 Ec/(μS/cm)	324.3 ± 73.8 <sup>c</sup>	397.3 ± 90.3 <sup>c</sup>	676.1 ± 245.8 <sup>a</sup>	640.3 ± 18.1 <sup>ab</sup>	607.4 ± 53.6 <sup>b</sup>	349.7 ± 92.1 <sup>c</sup>
总氮 TN/(mg/L)	4.27 ± 2.25 <sup>ab</sup>	3.74 ± 1.03 <sup>b</sup>	5.00 ± 2.70 <sup>a</sup>	3.24 ± 1.25 <sup>b</sup>	2.43 ± 1.65 <sup>c</sup>	3.59 ± 2.35 <sup>b</sup>
氮磷比 N/P	16.7 ± 3.6 <sup>a</sup>	15.7 ± 4.3 <sup>ab</sup>	16.5 ± 6.2 <sup>a</sup>	13.4 ± 3.8 <sup>b</sup>	5.9 ± 3.9 <sup>c</sup>	15.8 ± 3.5 <sup>a</sup>

注:同行数据不含相同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

Notes: Values in the same row with different letters mean significant difference ( $P < 0.05$ ).

### 2.2 浮游植物群落组成

#### 2.2.1 浮游植物种类组成

2018 年苏州城区河道共鉴定出浮游植物 7 门 85 属 209 种(包括变种和变型),种类组成主要集中在绿藻门、硅藻门和蓝藻门这三大门类,其中绿藻门 33 属 76 种(36.36%),硅藻门 23 属 63 种(30.14%),蓝藻门 18 属 33 种(15.79%),共占总种数的 82.29%,而裸藻门 6 属 28 种(13.40%),甲藻门 2 属 4 种(1.91%),金藻门 2 属 3 种(1.44%),黄藻门 1 属 2 种(0.96%),物种数较少(图 2)。

#### 2.2.2 浮游植物生物量变化及功能群的划分

浮游植物总生物量最高值出现在 7 月,为 99.62 mg/L,最低值出现在 11 月,为 3.19 mg/L,其余 5 月(63.73 mg/L) > 1 月(17.05 mg/L) > 3 月(14.16 mg/L) > 9 月(7.14 mg/L),各月份间生物量差异显著( $P < 0.05$ )。1 月的藻类生物量变化范围为 0.16 ~ 10.80 mg/L,3 月藻类生物量变化范围为 0.28 ~ 5.49 mg/L,5 月藻类生物量变化范围为 0.65 ~ 34.43 mg/L,7 月藻类生物量变化范围为 0.82 ~ 40.90 mg/L,9 月藻类生物量变

化范围为 0.09 ~ 2.41 mg/L,11 月藻类生物量变化范围为 0.04 ~ 1.48 mg/L。整体来看,山塘片区和城西片区生物量在多个月份相对较高(图 3)。

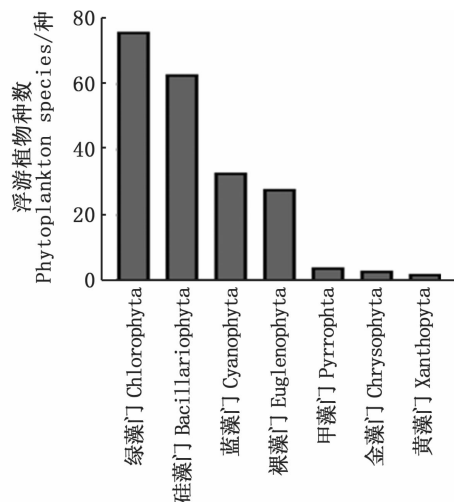


图 2 苏州城区河道浮游植物组成

Fig. 2 Proportion of phytoplankton in the urban river courses of Suzhou City

依据 REYNOLDS 等<sup>[10]</sup>及 PADISÁK 等<sup>[11]</sup>等

增补的浮游植物功能群分类方法对2018年苏州城区河道浮游植物组成进行划分,可划分为29个功能群(表2):M、B、X1、J、P、D、C、H1、S1、Lo、X2、F、W1、T、MP、Y、W2、X3、E、TB、TC、Z、SN、G、S2、N、K、A、LM。其中:功能群M、B、X1、J、P、D、

C、H1、S1、Lo、X2、F的出现频率均较高,为51.60%~100.00%;功能群W1、T、MP、Y、W2、X3、E出现频率适中,为21.14%~47.93%;功能群TB、TC、Z、SN、G、S2、N、K、A、LM相对罕见,出现频率为0.76%~19.43%。

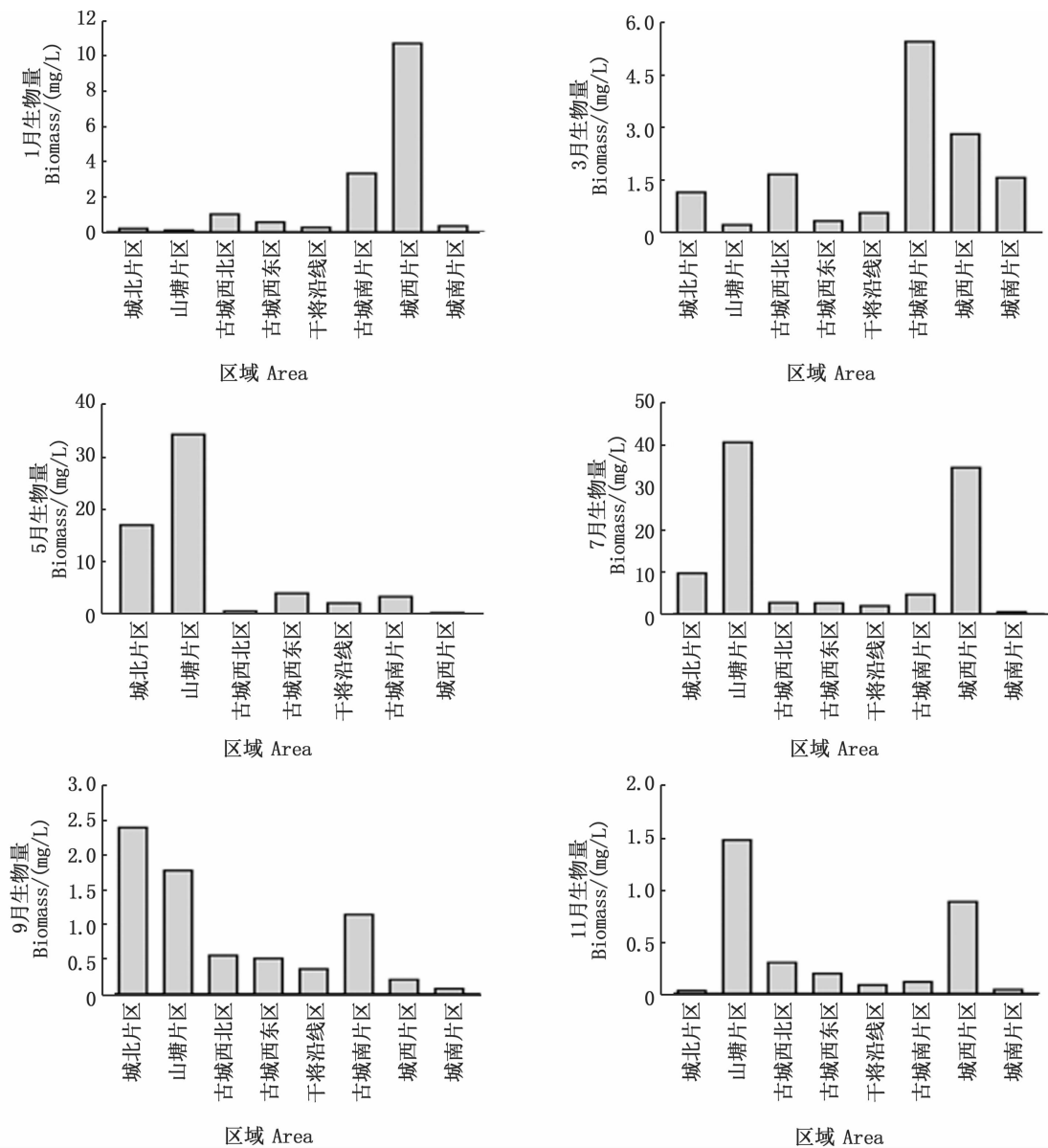


图3 苏州城区河道浮游植物生物量时空变化

Fig. 3 Spatial and temporal variation of phytoplankton biomass in the urban river courses of Suzhou City

表 2 苏州城区河道主要浮游植物功能群

Tab. 2 Main composition of phytoplankton functional groups in the urban river courses of Suzhou City

功能群 Functional groups	代表属/种 Representative species	出现频率 Frequency/%	门类 Phylum
A	根管藻 ( <i>Rhizosolenia</i> sp.)	2.96	硅藻门
B	小环藻属 ( <i>Cyclotella</i> spp.)	94.70	硅藻门
C	模糊沟链藻 ( <i>Aulacoseira ambigua</i> )、 梅尼小环藻 ( <i>Cyclotella meneghiniana</i> )、 星杆藻 ( <i>Asterionella</i> sp.)	75.69	硅藻门
D	针杆藻属 ( <i>Synedra</i> spp.)、菱形藻属 ( <i>Nitzschia</i> spp.)	75.79	硅藻门
E	锥囊藻属 ( <i>Dinobryon</i> spp.)、鱼鳞藻 ( <i>Mallomonas</i> sp.)	21.14	金藻门
F	微芒藻 ( <i>Micractinium</i> sp.)、蹄形藻属 ( <i>Kirchneriella</i> spp.) 四棘藻 ( <i>Treubaria</i> sp.)、卵囊藻属 ( <i>Oocystis</i> spp.)、 网球藻 ( <i>Dictyosphaerium</i> sp.)	51.06	绿藻门
G	实球藻 ( <i>Pandorina</i> sp.)、空球藻 ( <i>Eudorina</i> sp.)	12.24	绿藻门
HI	长孢藻属 ( <i>Dolichospermum</i> spp.)、 束丝藻 ( <i>Aphanizomenon</i> sp.)	60.90	蓝藻门
J	多芒藻属 ( <i>Golenkinia</i> spp.)、四角藻属 ( <i>Tetraedron</i> spp.)、 月牙藻属 ( <i>Selenastrum</i> spp.)、盘星藻属 ( <i>Pediastrum</i> spp.)、栅藻属 ( <i>Scenedesmus</i> spp.)、四星藻属 ( <i>Tetrastrum</i> spp.)、 十字藻属 ( <i>Crucigeninia</i> spp.)、集星藻 ( <i>Actinastrum</i> sp.)、空星藻属 ( <i>Coelastrum</i> spp.)、	88.36	绿藻门
K	隐杆藻 ( <i>Aphanothece</i> sp.)、隐球藻 ( <i>Aphanocapsa</i> sp.)	3.36	蓝藻门
Lo	平裂藻属 ( <i>Merismopedia</i> spp.)、 色球藻属 ( <i>Chroococcus</i> spp.)、多甲藻属 ( <i>Peridinium</i> spp.)	54.08	蓝藻门、甲藻门
LM	束球藻 ( <i>Gomphosphaeria</i> sp.)	0.76	蓝藻门
M	微囊藻属 ( <i>Microcystis</i> spp.)	100.00	蓝藻门
MP	舟形藻属 ( <i>Navicula</i> spp.)、羽纹藻属 ( <i>Pinnularia</i> spp.)、卵形藻属 ( <i>Cocconeis</i> spp.)、曲壳藻属 ( <i>Achnanthes</i> spp.)	38.91	硅藻门
N	鼓藻 ( <i>Cosmarium</i> sp.)、角星鼓藻 ( <i>Staurastrum</i> sp.)、 扭联角丝鼓藻 ( <i>Desmidium aptogonum</i> )	3.73	绿藻门
P	沟链藻属 ( <i>Aulacoseira</i> spp.)、 变异直链藻 ( <i>Melosira varians</i> )、脆杆藻属 ( <i>Fragilaria</i> spp.)、新月藻属 ( <i>Closterium</i> spp.)	82.26	硅藻门、绿藻门
S1	伪鱼腥藻 ( <i>Pseudoanabaena</i> sp.)、 浮丝藻属 ( <i>Planktothrix</i> spp.)	57.62	蓝藻门
S2	螺旋藻 ( <i>Spirulina</i> sp.)、极大节旋藻 ( <i>Arthrospira maxima</i> )	8.83	蓝藻门
SN	尖头藻 ( <i>Raphidiopsis</i> sp.)	15.29	蓝藻门
T	黄丝藻属 ( <i>Tribonema</i> spp.)、游丝藻 ( <i>Planctonema</i> sp.)、转板藻 ( <i>Mougeotia</i> sp.)	39.77	黄藻门、绿藻门
TB	异极藻属 ( <i>Gomphonema</i> spp.)	19.43	硅藻门
TC	席藻 ( <i>Phormidium</i> sp.)	19.16	蓝藻门
W1	裸藻属 ( <i>Euglena</i> spp.)、鳞孔藻 ( <i>Lepocinclis</i> sp.)、 扁裸藻属 ( <i>Phacus</i> spp.)、卡克藻属 ( <i>Khawkinia</i> spp.)	47.93	裸藻门
W2	囊裸藻属 ( <i>Trachelomonas</i> spp.)、 陀螺藻属 ( <i>Strombomonas</i> spp.)	26.09	裸藻门
X1	小球藻属 ( <i>Chlorella</i> spp.)、 纤维藻属 ( <i>Ankistrodesmus</i> spp.)	91.69	绿藻门
X2	衣藻 ( <i>Chancyomonas</i> sp.)	52.46	绿藻门
X3	弓形藻属 ( <i>Schroederia</i> spp.)	21.62	绿藻门
Y	裸甲藻 ( <i>Gymnodinium</i> sp.)	28.09	甲藻门
Z	聚球藻 ( <i>Synechococcus</i> sp.)	18.98	蓝藻门

2.2.3 浮游植物优势功能群的周年演替

将划分后的功能群按生物量的高低进行筛选和排序,采样点相对生物量 > 20% 的功能群定义为优势功能群,共有 19 个,分别为 B、C、D、G、H1、J、Lo、M、MP、P、S1、S2、T、TC、W1、X1、X2、Y、Z。从优势功能群的分布特征(图 4)来看:1 月以功能群 S1、B、H1 为主,分别占 29.59%、25.36%、8.19%;3 月以功能群 H1、D、C 为主,所占比例为 17.93%、16.45%、13.72%;5 月以功能

群 H1、B、W1 为主,分别占 30.60%、16.23%、15.25%;7 月以功能群 P、G、H1 为主,所占比例分别为 25.19%、12.55%、10.99%。9 月功能群 M 占据最大优势,所占比例为 19.86%,同时功能群 S1、P、H1 所占比例均较大,分别为 12.36%、11.52%、10.63%;11 月以功能群 C、M、H1 为主,分别占 20.89%、13.00%、12.56%。综合而言,以长孢藻和束丝藻为主的功能群 H1 在 6 次调查中均为优势功能群。

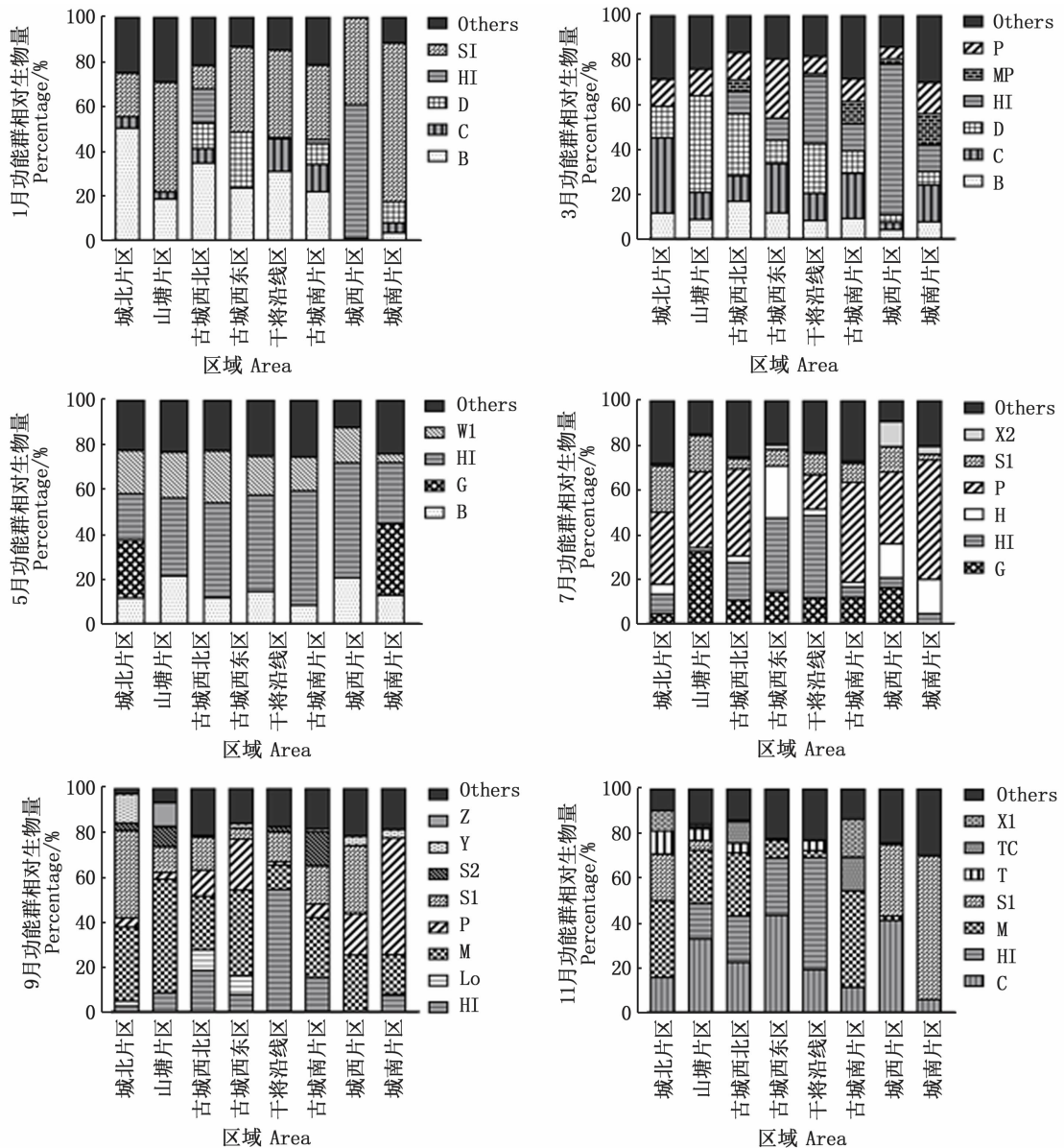


图 4 苏州城区河道各月浮游植物功能群组成

Fig. 4 Monthly composition of functional groups of phytoplankton in the urban river courses of Suzhou City

### 2.3 环境因子与浮游植物功能群演替的关系

结合全年 6 次调查的浮游植物优势功能群相对生物量及出现频率,最终选取 18 种浮游植物功能群进行 DCA 分析。发现长度梯度为 2.689 (小于 3),因此选用线性模型冗余分析 (RDA 分析)。对浮游植物功能群数据和环境因子进行显著性检验和筛选,蒙特卡洛检验结果为:水深 ( $P=0.007$ )、透明度 ( $P=0.027$ )、水温 ( $P=0.001$ )、溶解氧 ( $P=0.031$ )、pH ( $P=0.021$ )、电导率 ( $P=0.001$ )、总磷 ( $P=0.001$ )、总氮 ( $P=0.001$ )、氨氮 ( $P=0.018$ ) 是具有显著代表性的环境因子 ( $P<0.05$ )。RDA 分析表明,轴一和轴二的特征值分别为 0.414 和 0.235,水温、电导率、氨氮、总磷和总氮均与轴一呈正相关,水深、透明度、溶解氧和 pH 均与轴一呈负相关。RDA 排序图显示,对浮游植物优势功能群具有较大影响的环境因素有水温、总磷、总氮和电导率。水温与功能群 J、M、T 呈显著正相关 ( $P<0.05$ ),与功能群 S1 呈显著负相关 ( $P<0.05$ )。功能群 H1、M、S1、Z 与总氮和总磷呈显著正相关 ( $P<0.05$ )。电导率与功能群 H1、M、Z 呈显著正相关 ( $P<0.05$ )。见图 5。

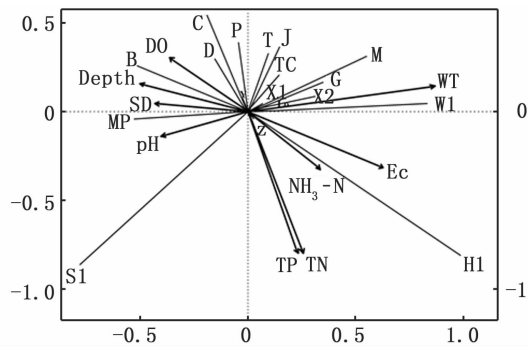


图 5 优势功能群生物量与环境因子的 RDA 分析  
Fig. 5 Redundancy analysis of the dominant functional groups related to environmental factors

## 3 讨论

### 3.1 浮游植物功能群的周年演替特征

根据优势功能群组成来看,2018 年以长孢藻和束丝藻为主的功能群 H1 占据绝对优势,河道水深周年变化范围均在 3 m 以内,给适宜浅水生长的功能群 H1 提供了有利的条件<sup>[11]</sup>。除此以外,冬季(1 月)至初春(3 月)的优势功能群主要包括以小环藻为主的功能群 B、以梅尼小环藻和

星杆藻为主的功能群 C 以及以针杆藻和菱形藻为主的功能群 D,它们多是耐受低光照、低温且适宜生长在中营养浅水水体的硅藻类群<sup>[10-11]</sup>,这一时期较低的水温使它们在竞争中取得优势。春季末(5 月)的优势功能群主要有以裸藻和扁裸藻为主的功能群 W1,此时总氮和氨氮平均值均为全年最高,丰富的氮元素导致喜有机污染环境的的功能群 W1 数量增多。有研究指出,河道中丝状的直链藻和体积较大的实球藻在夏季大量繁殖,成为优势种类<sup>[19]</sup>,这与本研究中夏季初(7 月)优势功能群主要包括以沟链藻为主的功能群 P 及以实球藻和空球藻为主的功能群 G 的结果相吻合。属于功能群 P 的这类硅藻相对较重,静止水体中容易下沉,它在一定程度上耐受低光<sup>[10]</sup>,这一时期河道的透明度较低,致使水体透光性变差,使其占据优势。功能群 G 适宜生长在温度较高的季节,此时的水温有利于其生长和繁殖。秋季(9 月、11 月)的优势功能群主要包括以微囊藻为主的功能群 M 和以伪鱼腥藻为主的功能群 S1,两者均为易形成水华的蓝藻类群<sup>[29-31]</sup>。整体来看,苏州城区河道 2018 年浮游植物功能群呈现出 B + C + D + H1 → W1 + H1 → P + G + H1 → M + S1 + H1 的周年演替特征。功能群物种及数量变化,与其生长繁殖的环境息息相关,处于优势地位的功能群多为浑浊、营养盐含量充足水域中的常见类群<sup>[10-11]</sup>,它们的存在表征了苏州城区河道处于富营养化的状态。

### 3.2 浮游植物功能群与环境因子的关系

相关研究<sup>[32]</sup>表明,外部环境的复杂性和资源的限制性,导致调节浮游植物群落演替的机制是复杂的。水温、光照、营养盐状况、水生动物的摄食等都是影响浮游植物群落结构变化的关键因素。本研究中浮游植物生物量在初夏(7 月)与春末(5 月)较高,说明水温的升降影响了浮游植物现存量。在空间分布上,山塘片区和城西片区的浮游植物生物量在多个月份较高。调查显示,山塘片区总氮和总磷均值高达  $(4.40 \pm 1.11)$  mg/L 和  $(0.29 \pm 0.09)$  mg/L,城西片区总氮和总磷均值高达  $(6.36 \pm 3.69)$  mg/L 和  $(0.75 \pm 0.72)$  mg/L,可见氮磷营养盐状态同样是影响浮游植物现存量的重要决定因素。

浮游植物功能群对环境变化的反映比个体的反映更为重要、准确且综合性更强<sup>[15]</sup>,并且有

效结合了浮游植物群落的演替过程,能够较好预测特定生境下浮游植物的群落分布状况<sup>[33]</sup>。RDA 分析显示,水温、总氮、总磷、电导率对浮游植物功能群变化影响较明显。以栅藻和空星藻等为主的功能群 J、以微囊藻为主的功能群 M 和以游丝藻为主的功能群 T 均与水温呈显著正相关,这些功能群的代表种类属于蓝藻门和绿藻门,它们更适宜生长在水温较高的季节<sup>[34-36]</sup>。苏州城区河道受到周边住宅区生活污水、垃圾和工厂废气等大量营养物质输入的影响,河道中的氮磷营养盐充足,有效的养分对浮游植物群落结构的变化也发挥了巨大作用。以长孢藻、束丝藻、微囊藻、伪鱼腥藻、聚球藻构成的功能群 H1、M、S1、Z 均与总氮和总磷含量呈显著正相关,这几个功能群常是富营养水体中的优势功能群<sup>[2]</sup>。调查期间,总氮和总磷含量均处于高水平状态,蓝藻得以利用丰富的氮元素和磷元素,从某种程度上也决定了功能群 H1 全年占据绝对优势的结果。研究<sup>[37]</sup>发现,当太湖水体中总氮质量浓度高于 0.8 mg/L,总磷质量浓度高于 0.2 mg/L 时,蓝藻的生长就不再受限制。由此可知,虽然苏州城区河道面临着严重的富营养化问题,但水体中总氮和总磷含量仍是影响浮游植物功能群变化的重要环境因子,可见控制氮磷营养盐含量的外源输入和内源释放,从而有效防控藻类的爆发能起到关键作用,应是对河道进行生态修复时需关注的重点。

#### 参考文献:

- [1] 王振方,张玮,杨丽,等. 异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2249-2257.  
WANG Z F, ZHANG W, YANG L, et al. Characteristics of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in different regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China[J]. Environmental Science, 2019, 40(5): 2249-2257.
- [2] 张真,胡忠军,史先鹤,等. 千岛湖浮游植物群落结构及功能群的划分[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(1): 37-48.  
ZHANG Z, HU Z J, SHI X H, et al. Community structures and functional groups of phytoplankton in Qiandao Lake[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(1): 37-48.
- [3] SOMMER U, ADRIAN R, DE SENERPONT DOMIS L, et al. Beyond the plankton ecology group (PEG) model: mechanisms driving plankton succession[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2012, 43(1): 429-448.
- [4] 陈延松,刘宁,赵秀侠,等. 苏州七浦塘流域浮游植物群落特征及其与环境因子分析[J]. 合肥师范学院学报, 2015, 33(3): 56-61, 65.  
CHEN Y S, LIU N, ZHAO X X, et al. Study on phytoplankton community structure and environmental factors in the Qiputang River [J]. Journal of Hefei Normal University, 2015, 33(3): 56-61, 65.
- [5] WINDER M, SOMMER U. Phytoplankton response to a changing climate[J]. Hydrobiologia, 2012, 698(1): 5-16.
- [6] 俞秋佳,徐凤洁,蒋跃,等. 夏秋季苏州河浮游植物群落特征及其影响因子[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(4): 450-457.  
YU Q J, XU F J, JIANG Y, et al. Characteristics of phytoplankton community in Suzhou River in summer and autumn and their affecting factors[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2014, 30(4): 450-457.
- [7] BRANTES N, ANTUNES S C, PEREIRA M J, et al. Seasonal succession of cladocerans and phytoplankton and their interactions in a shallow eutrophic lake (Lake Vela, Portugal) [J]. Acta Oecologica, 2006, 29(1): 54-64.
- [8] 段金荣,张宪中,刘凯,等. 鲢鳙鱼和藻类治理关系的初步研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(20): 327-330.  
DUAN J R, ZHANG X Z, LIU K, et al. The preliminary study on the relation between carp fish and algae [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(20): 327-330.
- [9] 张国栋. 利用鲢鳙鱼及水生植物控制平原水库富营养化的研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2011.  
ZHANG G D. Study on the control of plain reservoir eutrophication by silver carp and bighead carp and aquatic plants [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2011.
- [10] REYNOLDS C S, HUSZAR V, KRUK C, et al. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton[J]. Journal of Plankton Research, 2002, 24(5): 417-428.
- [11] PADISÁK J, CROSSETTI L O, NASELLI-FLORES L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates [J]. Hydrobiologia, 2009, 621(1): 1-19.
- [12] 郑诚,陆开宏,徐镇,等. 四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2688-2697.  
ZHENG C, LU K H, XU Z, et al. Seasonal succession of phytoplankton functional groups and their driving factors in the Siminghu Reservoir[J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2688-2697.
- [13] 王汨,马思琦,杨柏贺,等. 北运河水系秋季浮游植物功能群与水环境因子的关系[J]. 水产科技情报, 2019, 46(3): 176-180.



- WANG M, MA S Q, YANG B H, et al. The relationship of phytoplankton functional groups and environmental factors in autumn in North Canal in Beijing[J]. Fisheries Science & Technology Information, 2019, 46(3): 176-180.
- [14] MA C X, CHULA MWAGONA P, YU H X, et al. Spatial and temporal variation of phytoplankton functional groups in extremely alkaline Dali Nur Lake, North China[J]. Journal of Freshwater Ecology, 2019, 34(1): 91-105.
- [15] 钱奎梅, 刘宝贵, 陈宇炜. 鄱阳湖浮游植物功能群的长期变化特征(2009-2016年)[J]. 湖泊科学, 2019, 31(4): 1035-1044.
- QIAN K M, LIU B G, CHEN Y W. Long term dynamics of phytoplankton functional groups in Lake Poyang during 2009-2016[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(4): 1035-1044.
- [16] 蔡晓钰, 姜宇, 薛亮, 等. 苏州市吴中区河道水环境现状及治理对策浅析[J]. 水利信息化, 2011(1): 35-39.
- CAI X Y, JIANG Y, XUE L, et al. Analysis on water environment status and countermeasures for river course of Wuzhong District in Suzhou [J]. Water Resources Informatization, 2011(1): 35-39.
- [17] 万蕾, 朱伟. 重污染河道中浮游植物初级生产力特征[J]. 生态环境学报, 2010, 19(1): 34-39.
- WAN L, ZHU W. The primary productivity in severe polluted urban river[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(1): 34-39.
- [18] 万蕾, 朱伟. 重污染河道浮游动物种群的特点[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 869-873.
- WAN L, ZHU W. Community structure of zooplankton in polluted river [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(3): 869-873.
- [19] 万蕾, 朱伟, 操家顺, 等. 苏州重污染河道水体浮游植物消长规律初探[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(2): 237-243.
- WAN L, ZHU W, CAO J S, et al. Growth of phytoplankton in polluted river in Suzhou City [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2006, 15(2): 237-243.
- [20] 苏明玉, 吕清, 顾晓明. 苏州城区河道水质现状分析[J]. 干旱环境监测, 2015, 29(3): 104-109.
- SU M Y, LV Q, GU X M. Current water quality analysis of the river in the Suzhou urban area[J]. Arid Environmental Monitoring, 2015, 29(3): 104-109.
- [21] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- HU H J, WEI Y X. The freshwater algae of China: systematics, taxonomy and ecology [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [22] 韩茂森, 束蕴芳. 中国淡水生物图谱[M]. 北京: 海洋出版社, 1995.
- HAN M S, SHU Y F. Atlas of freshwater biota in China [M]. Beijing: China Ocean Press, 1995.
- [23] 国家环境保护总局, 《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- State Environmental Protection Administration. Standard methods for examination of water and wastewater [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [24] 余海霞, 来勇, 赵佳佳, 等. 城市河道浮游植物群落多样性指数对水质的指示作用[J]. 化学与生物工程, 2016, 33(9): 32-36.
- YU H X, LAI Y, ZHAO J J, et al. Water quality indication of phytoplankton community diversity index in urban rivers [J]. Chemistry & Bioengineering, 2016, 33(9): 32-36.
- [25] ZHANG M, YU Y, YANG Z, et al. Deterministic diversity changes in freshwater phytoplankton in the Yunnan-Guizhou Plateau lakes in China[J]. Ecological Indicators, 2016, 63: 273-281.
- [26] 王徐林, 张民, 殷进. 巢湖浮游藻类功能群的组成特性及其影响因素[J]. 湖泊科学, 2018, 30(2): 431-440.
- WANG X L, ZHANG M, YIN J. Composition and influential factors of phytoplankton function groups in Lake Chaohu[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(2): 431-440.
- [27] 安睿, 康铁东, 于立峰. 小兴凯湖湿地浮游生物功能群季节性变化研究[J]. 防护林科技, 2018(2): 16-19.
- AN R, KANG T D, YU L F. Seasonal changes of plankton functional groups in Xiaoxingkaihu wetland [J]. Protection Forest Science and Technology, 2018(2): 16-19.
- [28] TANG C Y, SUN B, YU K F, et al. Environmental triggers of a *Microcystis* (Cyanophyceae) bloom in an artificial lagoon of Hangzhou Bay, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 135: 776-782.
- [29] SOYLU E N, GÖNÜLOL A. Functional classification and composition of phytoplankton in Liman Lake [J]. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2010, 10(1): 53-60.
- [30] 胡月敏, 李秋华, 朱冲冲, 等. 基于功能群对比分析黔中普定水库和桂家湖水库浮游植物群落结构特征[J]. 湖泊科学, 2018, 30(2): 403-416.
- HU Y M, LI Q H, ZHU C C, et al. Contrasting phytoplankton structure based on functional groups of Puding Reservoir and Guijiahu Reservoir in the central of Guizhou Province[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(2): 403-416.
- [31] ZHU K X, BI Y H, HU Z Y. Responses of phytoplankton functional groups to the hydrologic regime in the Daning River, a tributary of Three Gorges Reservoir, China [J]. Science of the Total Environment, 2013, 450-451: 169-177.
- [32] INTERLANDI S J, KILHAM I S S. Limiting resources and the regulation of diversity in phytoplankton communities[J]. Ecology, 2001, 82(5): 1270-1282.
- [33] 杨丽, 张玮, 尚光霞, 等. 淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系[J]. 环境科学, 2018, 39(7): 3158-3167.
- YANG L, ZHANG W, SHANG G X, et al. Succession

- characteristics of phytoplankton functional groups and their relationships with environmental factors in Dianshan Lake, Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(7): 3158-3167.
- [34] 崇磷璇, 刘儒汗, 尹丽平, 等. 网围养蟹对浮游植物群落结构变化的影响[J]. *上海海洋大学学报*, 2019, 28(2): 237-246.
- CHONG L X, LIU R H, YIN L P, et al. Effect of pen crab farming on phytoplankton community structure[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2019, 28(2): 237-246.
- [35] 闫苏苏, 雷波, 刘朔孺, 等. 长寿湖浮游植物功能群季节变化及影响因子[J]. *水生态学杂志*, 2018, 39(3): 52-60.
- YAN S S, LEI B, LIU S R, et al. Seasonal variation of phytoplankton functional groups in Changshou Lake and relevant environmental factors[J]. *Journal of Hydroecology*, 2018, 39(3): 52-60.
- [36] STAEHR P A, BIRKELAND M J. Temperature acclimation of growth, photosynthesis and respiration in two mesophilic phytoplankton species[J]. *Phycologia*, 2006, 45(6): 648-656.
- [37] 王梦梦, 张玮, 杨丽, 等. 上海市河道水体拟浮丝藻生物量与环境因子的回归分析[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(1): 187-193.
- WANG M M, ZHANG W, YANG L, et al. Regression analysis between *Planktothricoides* spp. biomass and environmental factors in urban rivers from Shanghai, China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(1): 187-193.

## Succession characteristics and responses to environmental factors of phytoplankton functional groups in river courses in the urban area of Suzhou City

MA Jie<sup>1,2,3</sup>, SHEN Liya<sup>1,2,3</sup>, HE Peimin<sup>4,5</sup>, TIAN Xiaocen<sup>1,2,3</sup>, CHEN Lijing<sup>1,2,3</sup>

(1. *National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*; 2. *Shanghai Engineering Research Center of Aquaculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*; 3. *Shanghai Collaborative Innovation for Aquatic Animal Genetics and Breeding, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*; 4. *College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*; 5. *Water Environment & Ecology Engineering Research Center of Shanghai Institution of Higher Education, Shanghai 201306, China*)

**Abstract:** Suzhou is one of the central cities in the Yangtze River Delta, which has recently been facing increasingly serious eutrophication-related problems in the river courses in its urban area. To investigate the structural composition, annual succession and responses to environmental factors of phytoplankton functional groups in the river courses in the urban area of Suzhou, a bimonthly survey and its analysis were conducted in 2018. A total of 209 phytoplankton species were identified from 85 genera and 7 phyla throughout the year, 29 phytoplankton functional groups were marked out, among which 19 (B, C, D, G, H1, J, Lo, M, MP, P, S1, S2, T, TC, W1, X1, X2, Y and Z) were the dominant functional groups in this area. The annual succession of phytoplankton functional groups was characterized as follows: B + C + D + H1 → W1 + H1 → P + G + H1 → M + S1 + H1. H1 was found to be dominant throughout the year. The RDA analysis showed that water temperature (WT), total nitrogen content (TN), total phosphorus content (TP) and electrical conductivity (Ec) were identified as the main factors affecting the changes in phytoplankton functional groups in the urban river courses of Suzhou City.

**Key words:** Suzhou; urban river course; phytoplankton functional group; annual succession; environmental factor