

上海市河道周丛藻类群落特征与环境因子间的关系研究

梁霞¹, 李小平^{1,2*}, 顾詠洁³

(1. 华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062; 2. 上海市环境科学研究院, 上海 200233; 3. 华东师范大学环境科学系, 上海 200062)

摘要:通过对上海地区主要水体黄浦江、苏州河 7 个断面周丛藻类群落及水质情况的全年连续监测, 同时结合研究区域的物理生境、水文学指标等环境因子, 采用多元统计方法, 分析藻类群落的种类组成与数量特征, 以及环境因子对藻类群落的主要影响关系. 结果表明, ①周丛藻类群落具有明显的时空变化趋势, 藻类数量及群落密度均在上游区域以及水温较高条件下增加, 而群落多样性则在下游及低温条件下显著降低($p < 0.05$); ②水质、水域功能区划类型以及氮、磷等营养物质浓度是影响藻类种类组成及分布差异的主要环境因子; ③一些具有较高优势度的周丛藻类, 如系带舟形藻(*Navicula cincta*)、微小色球藻(*Chroococcus minutus*)和钝脆杆藻(*Fragilaria capucina*)对水体氮、磷营养物质变化具有很高的敏感性, 从而可作为不同区域水体水质的有效指示藻类.

关键词:周丛藻类; 群落特征; 环境因子; 生物监测

中图分类号: X835 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)08-1662-08

Environmental Impacts on Periphyton Assemblage in Shanghai's Main Urban Rivers, China

LIANG Xia¹, LI Xiao-ping^{1,2}, GU Yong-jie³

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 3. Department of Environmental Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: A monthly monitoring program of periphyton was conducted on two main urban rivers of Shanghai from April 2005 to March 2006. Parameters of periphyton assemblage and main environmental variations, including physical habitation and hydrological factors, were analyzed by multivariate analyses (cluster analysis, indicator species analysis and canonical correspondence analysis). It showed that a remarkable spatial-temporal variation pattern was observed for periphyton assemblage: taxa numbers and density were abundant at upstream in warm weathers, while diversity decreased significantly at downstream in cold seasons ($p < 0.05$). The results also indicated that water quality, watershed function zone and nutrients (i.e. nitrogen and phosphorus) were the main environmental factors influencing periphyton species composition. The findings further suggested 12 periphyton species, including *Navicula cincta*, *Chroococcus minutus* and *Fragilaria capucina*, had significant indicator values for water quality and were highly sensitive to the concentrations of nitrogen and phosphorus, and these species could serve as a good bio-indicator of urban watersheds.

Key words: periphyton; assemblage characteristics; environmental factors; bio-monitor

周丛藻类由于其复杂的群落结构、独特的环境敏感性和快速的群落重建性^[1], 从而能够对水环境变化做出迅速地响应. 目前, 周丛藻类群落特征(如多样性、丰富度、种类组成等)已被用于环境污染物质监测和人类活动干扰对水体影响作用评价方面^[1-7], 利用周丛藻类进行水质生物监测与评价的水体也已涵盖海洋、湖泊、河流及城市河道等^[8-10].

在我国, 有关周丛藻类的研究起步较晚, 相关报道多集中在藻类生态学研究方面^[11-14]. 由于日益加速的城市化进程已对上海地区水生生物系统的健康发展构成威胁, 近年来, 研究者开始关注上海地区水环境变化及由此带来的对周丛藻类群落特征的改

变, 并试图通过短期的或季节性监测, 分析藻类群落与水环境因子间的相互关系, 对周丛藻类的水质生物监测应用作初步的探索性研究^[15, 16], 并为上海地区淡水生态学研究提供了生物学资料和参考依据. 然而这些相对零散的报道未能系统地反映出上海地区主要水体中周丛藻类的群落特征, 同时也缺乏对环境影响因子较为全面的分析, 从而降低了周丛藻类在水质监测评价应用中的真实性和有效性. 众多

收稿日期: 2006-09-22; 修订日期: 2006-12-21

基金项目: 上海市科委重大科技攻关项目(04DZ12030)

作者简介: 梁霞(1979~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为环境监测与生态环境修复工程, E-mail: asituya@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: xiaoping_lee@hotmail.com

研究证明^[17, 18],至少 1 a 以上的周丛藻类及水环境指标连续监测,可以较为完整地反映藻类群落的时空变化趋势及与环境因子间相互作用;在对城市水体中的藻类群落-环境影响分析时,还应考虑到诸如水域功能区划、周边土地利用类型、河道特征以及水文学指标对群落特征的影响。此外,指示生物常被认为是相对便捷和准确的水质生物监测指标^[19],如果能够针对上海市水环境特点提出较为有效的水质指示藻类,那么对于上海市水质生物监测工作的普及与开展具有重要意义。

本研究选取了上海地区主要水体——黄浦江、苏州河中的周丛藻类,通过对藻类群落特征(种类组成、生物密度、丰富度、多样性等)及其环境影响因子(水质、水域功能区划、土地利用类型,物理生境等)的全年连续监测,利用统计学方法(聚类分析、指示藻类分析、典型相关性分析等)对周丛藻类的时空变化趋势以及其与环境因子间的相互作用进行分析。本研究的主要目的,即揭示上海地区主要水体中周丛藻类群落的时空分布与演替特征,分析环境因子对群落特征变化的决定作用及主要环境影响因子,提出周丛藻类群落在反映水质状况和在水质生物监测应用中的有效性,以期为上海地区周丛藻类的水质生物监测评价应用提供可行性依据。

1 研究区域与样点选择

1.1 研究区域概况

上海市是中国重要的经济文化中心,其人口已超过 1 700 万。黄浦江和苏州河是流经上海地区的主要水体,为上海市提供了重要的城市水源及防泄洪通道,也是上海市主要的内河航运通道,其丰富的生物多样性也使其对于城市水生态系统的研究具有重要意义。

黄浦江源于太湖,是太湖流域重要的泄水通道,太湖水经淀山湖、园泄泾、太浦河和苏州河等河流汇入黄浦江,由吴淞口入长江。黄浦江在上海市境内的集水面积约 5 000 km²,约占全市面积的 80%。黄浦江从淀峰至吴淞口全长 113.4 km,其中市区段约 31 km,江面宽 300 ~ 500 m,下游吴淞口附近宽约 800 m,水深 5 ~ 15 m。黄浦江为半日型强感潮河流,其河口潮差平均为 2.3 m 左右,其中吴淞口平均每潮泄潮量约 5.1×10^8 m³,最大进潮流量为 1.21×10^4 m³·s⁻¹。由于担负着上海市内河航运及水利防洪的重要作用,黄浦江均以石质或水泥驳岸为主,除少量泥沙淤积及河道转弯浅滩区域着生大型水生植物

外,其它区域均无水生植物着生及植被覆盖。

苏州河是黄浦江的最大支流,它源于江苏省东太湖瓜泾口,流经江苏省并于上海市区的外白渡桥汇入黄浦江,是太湖与黄浦江的主要联系水道之一。苏州河全长 125 km,在上海市境内约长 53.1 km,其中市区段长 17 km。苏州河水道曲折,水流平缓,市区内有急弯 9 处,河宽 40 ~ 60 m,河口宽约 130 m 左右,航槽平均水深在最低水位时约 2 m。受到黄浦江潮汐影响,苏州河也属于感潮型河流,可容纳黄浦江进潮量的 2% ~ 3%,常年平均径流量约 20 ~ 40 m³·s⁻¹,汛期最大流量可达 70 ~ 100 m³·s⁻¹。自 1920 年开始,苏州河市区段就出现了黑臭现象。随着工业发展、人口增加,苏州河污染逐渐上溯扩大。至 1978 年,苏州河在上海境内已全部遭受污染,市区段水质已劣于《地面水环境质量标准》(GB 3838-88)的 V 类标准^[20]。随着上海市经济及城市建设的发展,政府逐渐加强了对这条“黑臭河道”的重视程度。1993 年上海市建成苏州河一期污水截流程,污水来源大大减少,水质有所改善,至 2000 年基本消除了苏州河干流的黑臭现象^[21],目前苏州河水质已表现出日益好转的趋势。与黄浦江相似,其两岸也均以石质或水泥驳岸为主,植被覆盖率较低。

1.2 样点选择

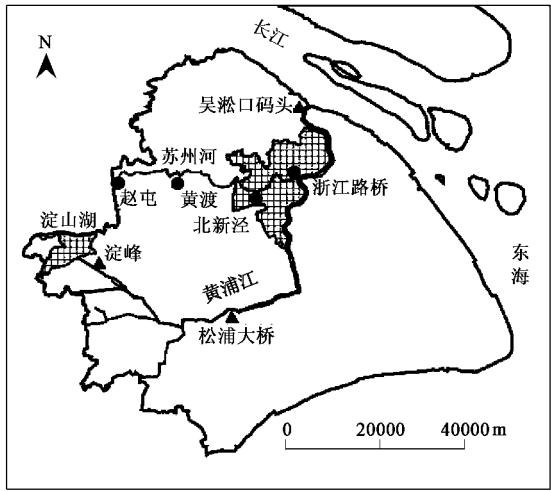
为了尽可能与常规水质监测站点相一致,同时又能代表黄浦江和苏州河的主要特征,本研究分别选取了黄浦江上的 3 个断面和苏州河上的 4 个断面作为周丛藻类及水质监测取样点。黄浦江上的 3 个采样断面分别为源头的淀峰、上游的松浦大桥以及入长江口的吴淞口码头。苏州河上的 4 个采样断面分别为赵屯、黄渡、北新泾桥和浙江路桥。其中北新泾桥和浙江路桥 2 个断面均处于中心城区。具体分布详见图 1。

2 样品采集与数据分析

2.1 样品采集

于 2005-04 ~ 2006-03 对所有样点的周丛藻类及水样进行每月采集。其中 pH、水温、氧化还原电位(ORP)、叶绿素 a 及溶解氧(DO)浓度均采用 HYDROLAB 多功能水质测定仪进行现场监测。水体透明度采用黑白盘法。其它水质指标由现场采样并进行实验室内分析。每个样点采集水样 2 份,置于便携式冰箱中并于 5 h 内带回实验室分析。

由于黄浦江、苏州河各样点水生植物分布不均匀,且边岸基质不均一,因此本研究采用挂硅藻计的



▲代表黄浦江取样点;●代表苏州河取样点,
填充内容分别代表淀山湖及中心城区
图1 研究区域(黄浦江和苏州河)及取样点示意
Fig.1 Study area showing two investigation areas
(Huangpu River, Suzhou Creek) and sampling sites

方法采集周丛藻类样品.于采样前 1 周将硅藻计放置于取样点附近.为了尽量减少水流及船舶行进过程中形成的水浪冲击,挂样地点均选择在水流较缓、无植被遮盖的边岸区域,并适当掩蔽.取标准载玻片 10 片(7.5 cm × 2.0 cm, 每片总表面为 30 cm²)置于木制硅藻计中,每个载玻片间隔约 2 cm.硅藻计置于水面下 10 cm 处,并使之平行于水流方向.取样时随机选择 2 个载玻片,用硬毛牙刷将其上着生的藻类刮下,并置于 1 L 该样点水样中.摇匀后平均分装在 2 个 500 mL 的采样瓶中.向用于定性鉴定的藻类样品中添加 4% 的福尔马林液,同时用于定量分析的藻类样品保存在 1% 的鲁哥氏液中.

对于研究区域的物理生境因子和水文学数据均参考文献[22, 23].

2.2 样品处理与分析

吸取适量定性周丛藻类样品,置于 × 40 倍 Motic DM-BA300 显微镜下进行种类鉴定.一般鉴定到属或种,优势种到种,其中每一样品的优势种类鉴定数量在 400 个细胞以上.对于优势硅藻种类,采用 HCl-H₂O₂ 方法作进一步的种类鉴定.取 1 mL 摇匀的藻类样品,利用 30% H₂O₂ + 35% HCl 混合液反复冲洗,直至去除多余的有机物质及不溶的 CaCO₃.然后在 × 100 油镜下进行种类鉴定.每一样品共统计 400 个细胞个体以上.所有的周丛藻类样品鉴定均参照沈蕴芬及韩茂森等^[24, 25]的方法.用于定量分析的周

丛藻类样品置于沉淀器中沉淀 24 h.样品浓缩至 10 mL 后,用微量加液器吸取 0.1 mL 的浓缩液于 20 mm × 20 mm 藻类计数框中.在 × 40 倍显微镜下采用目镜行格法进行计数.每片计数 10 行.所有样品均重复鉴定 2 次,有效统计数值取平均后即为该片的生物数量.每一样品的周丛藻类密度由单位面积上的细胞个体数表示(cells • cm⁻²).同时计算每一藻类样品的相对丰富度(%).

水质指标的测定均依据标准方法^[26],其中过滤水样(0.45 μm 滤孔,醋酸纤维滤膜)用以分析总固体悬浮颗粒物浓度(TSS)、硝酸盐氮浓度(NO₃⁻)和正磷酸盐浓度(PO₄³⁻),未过滤水样用以分析其它的水质指标.总氮(TN)测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法,总磷(TP)采用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法,NO₃⁻ 采用紫外分光光度法,氨氮(NH₄⁺)采用纳氏试剂比色法,PO₄³⁻ 采用钼酸铵分光光度法,TSS 采用重量法,COD 和 BOD₅ 采用重铬酸盐法和稀释与接种法.

2.3 数据分析

周丛藻类群落结构以相对丰富度表示^[27].其中藻类相对丰富度 % = $\frac{i \text{ 种藻类细胞数}}{\text{藻类总细胞数}} \times 100\%$ ^[28]

Shannon 多样性指数 $H' = \sum \frac{n_i}{N} \times \log_2 \frac{n_i}{N}$

式中 n_i 为第 i 种藻类的着生密度, N 为总着生密度^[29].

利用聚类分析中的“非加权配对组算术”(unweighted pair-group method analysis, UPGMA)^[30]方法确定周丛藻类的分布模型,选择 Bray-Curtis 距离分类,并设 $\beta = -0.25$.为了减少“少见”物种对整个分析结果的影响,仅选择相对多样性 > 1% 的藻类(47 种)进入统计分析^[31].为了更好地表达周丛藻类的空间分布特征,进行了指示物种分析(indicator species analysis, ISA)^[32].利用 Monte Carlo 序列检验确定每一指示物种的统计显著性(999 个序列, $p < 0.05$).

应用典型相关性分析(canonical correspondence analysis, CCA)对周丛藻类的种类分布与环境变量间的相关性进行分析^[33].为了减少周丛藻类变量的偏峰影响,对种类丰富度和水质指标中的叶绿素 a 浓度、TP、NO₃⁻ 和 TSS 进行 lg($x + 1$)转换,并利用 Monte Carlo 序列检验确定物种-环境间的显著相关性($p < 0.01$)^[34].UPGMA、ISA 及 CCA 分析均由 PC-ORD V.4.0 统计软件完成^[35].方差分析(AVON)、

相关性分析及其显著性检验均利用 SPSS12.0 完成.

3 结果与讨论

3.1 周丛藻类群落结构与时空分布特征

通过 1 a 的连续监测,共检出周丛藻类 126 个种,44 个属,4 个门.在 2 个水体中均出现的藻类有 65 种,其中硅藻门占 69%,绿藻门占 21.5%,蓝藻门占 9.5%.此外,小环藻属(*Cyclotella*)、异极藻属(*Gomphonema*)和舟型藻属(*Navicula*)是种类数量最多的属,均出现 10 个以上的种类.黄浦江共出现周丛藻类 89 个种,其中硅藻门占 74.16%,而裸藻门仅占 1.12%.苏州河共出现周丛藻类 94 个种,40 个属,其中硅藻类的丰富度最高,占总数的 71.28%,绿藻和蓝藻次之,分别为 19.15%和 10.64%,裸藻数量最少.

在空间分布上,周丛藻类种类组成随着各取样断面位置的变化而改变(图 2a、2b).在黄浦江各采样断面,除硅藻始终作为藻类群落的主要种类外,上游区域绿藻优势度和群落多样性均较高,而下游河口区域蓝藻优势度逐渐增加,藻类群落多样性显著降低($p < 0.05$).与黄浦江相似,苏州河周丛藻类群落也表现出了空间分布的差异,群落多样性在下游浙江路桥断面出现显著下降($p < 0.05$),整个水体除硅藻、绿藻和蓝藻的比例基本保持一致外,裸藻群落数量仅在河流中下游地区表现出增长趋势.

在时间分布上,黄浦江淀峰、松浦大桥断面和苏州河赵屯、北新泾断面周丛藻类群落的种类组成均表现出明显的季节演替趋势(图 2c~2f):夏季各断面藻类群落多样性达到年最高值,伴随着绿藻和蓝藻群落在夏、冬季节的大量出现,硅藻着生密度下降.将以上各断面种类组成的季节性变化与水体营养物质浓度改变进行比较(图 3),结果表明,淀峰断面的氮(NO_3^- 和 NH_4^+)浓度与该断面绿藻($r = 0.79$, $p < 0.05$)、裸藻($r = 0.78$, $p < 0.05$)群落着生密度显著相关,这 2 个藻类群落随着夏季氮浓度的增加而大量出现;赵屯($r = 0.79$, $p < 0.05$)和北新泾($r = 0.76$, $p < 0.05$)断面的磷(TP 和 PO_4^{3-})浓度与绿藻群落具有显著相关性,随着春季水体 PO_4^{3-} 浓度的上升,绿藻丰富度增加.

聚类分析(UPGMA, $p < 0.05$)表明,黄浦江、苏州河中周丛藻类种类组成均表现出显著的空间差异(图 4).因此,根据藻类群落分布的相对丰富度和频度,对 7 个取样断面进行指示藻类分析.结果显示,共有 12 个藻类具有较高的指示值(表 1),其中黄浦

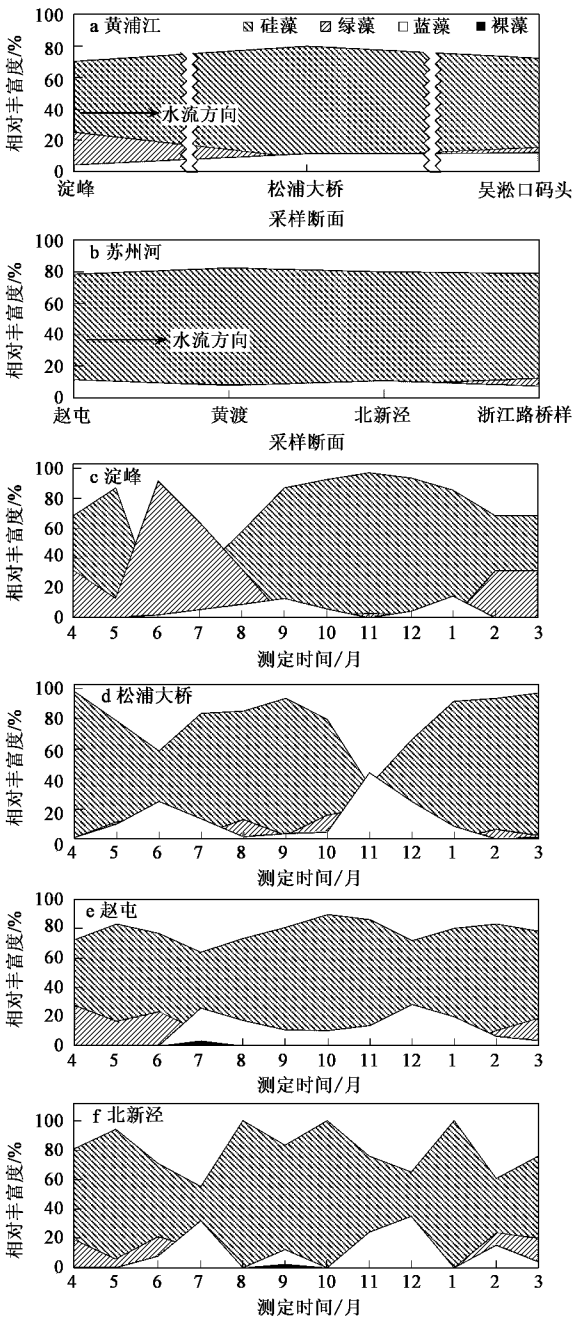


图 a、b 表示黄浦江、苏州河中周丛藻类空间分布趋势,其中图 a 断裂线表示 3 个断面间距较远;图 c~f 表示黄浦江淀峰、松浦大桥断面和苏州河赵屯、北新泾断面周丛藻类季节分布趋势

图 2 黄浦江、苏州河中周丛藻类群落的时间及空间分布规律

Fig.2 Spatial-temporal distribution of periphyton assemblage relative abundance in Huangpu River and Suzhou Creek

江上、中游区域共有 4 个硅藻种类,即普通等片藻(*Diatoma vulgare* Bory)、系带舟型藻 [*Navicula cincta* (Ehr.) Kütz]、意大利直链藻 [*Melosira italica* (Ehr.) Kütz] 和古老小环藻 (*Cyclotella antiqua* W. Smith), 1 个绿藻种类,拟细链藻 (*Leptosiropsis torulosa* Jao) 和 2

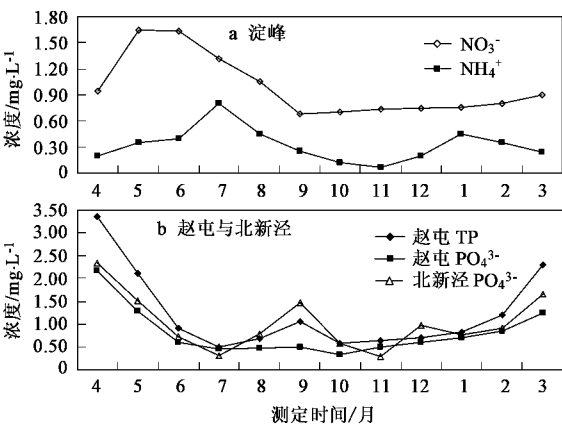


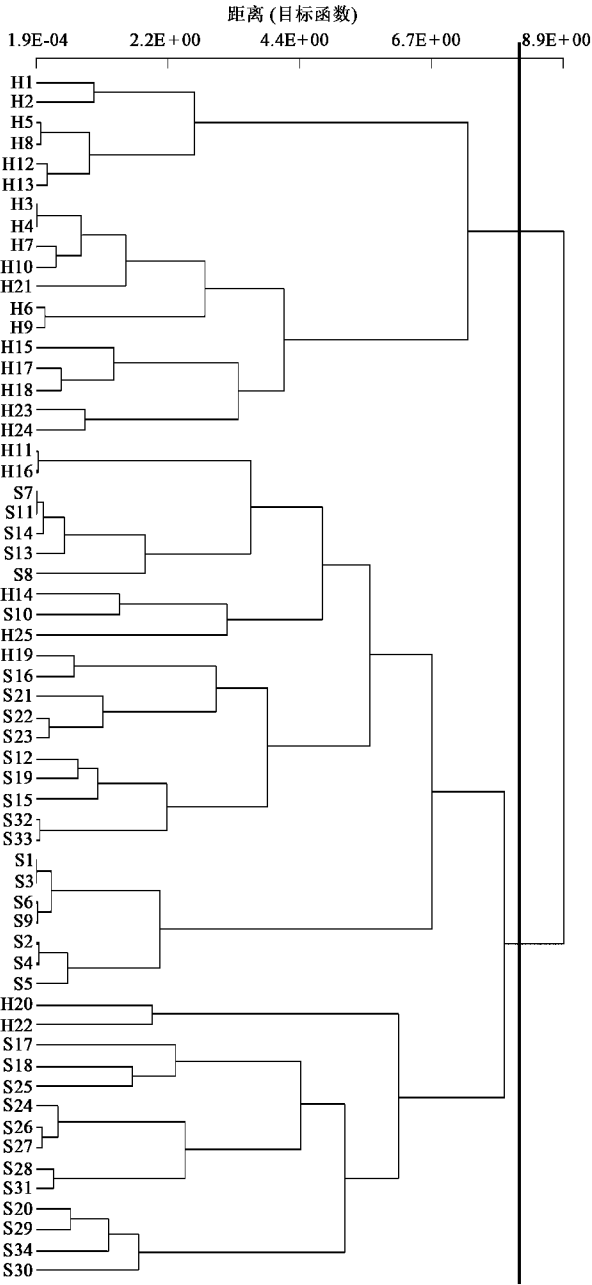
图 3 淀峰、赵屯与北新泾采样断面水体氮、磷浓度
Fig.3 Nitrogen and phosphorus concentration at sampling sites of Dianfeng, Zhaotun and Beixinjing

个蓝藻种类,即针状蓝纤维藻(*Dactylococcopsis acicularis* Lemm)和微小色球藻[*Chroococcus minutus* (Kütz.)Näg]表现出较高的指示结果,而双头针杆藻(*Synedra amphicephala* Kütz)在黄浦江下游的吴淞口段面表现出较高的指示值.硅藻门的隐头舟型藻(*Navicula cryptocephala* Kütz)、梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana* Kütz)、钝脆杆藻(*Fragilaria capucina* Desm)和纤细异极藻(*Gomphonema gracile* Ehr)分别在苏州河赵屯断面和北新泾桥断面具有较高的指示结果.

3.2 水域功能区划、水质分类及水环境特征

根据文献[36],黄浦江 3 个采样断面分别属于 2 种区划类型:黄浦江中上游区域的淀峰和松浦大桥是上海市重要的水源地,其中松浦大桥是上海市一级饮用水源保护区,因此被划定为Ⅱ类水域;下游吴淞口断面是上海市重要的化工及船舶港口,被定为Ⅳ类水域.苏州河上游的赵屯断面也属于Ⅳ类水域,而黄渡、北新泾桥和浙江路桥断面的河道功能主要以城市景观、内河航运以及泄洪排污为主,被划定为Ⅴ类水域.此外,根据文献[37]及 Ren 等[38]提出的水质分类标准,黄浦江的各水质指标表明其属于Ⅳ类水质,苏州河上游区域水质保持在Ⅴ类水质,下游位于中心城区的北新泾桥、浙江路桥断面,均属于劣Ⅴ类水质.

黄浦江与苏州河中的叶绿素 a、TP 和 TN 平均浓度表明这 2 个水体均属于富营养化类型[39],但是各营养物质浓度却表现出一定的时空变化趋势:在空间分布上,黄浦江上游河段水体具有较高的叶绿素 a 浓度,较低的营养物质浓度和 TSS.与之相反,



加粗黑线即表示 2 个周丛藻类着生区域的区分线,
H 代表黄浦江中的取样点,S 代表苏州河中的取样点

图 4 周丛藻类聚类分析结果

Fig.4 Dendrogram of periphyton-based river site classification using the UPGMA method

下游吴淞口码头断面叶绿素 a 浓度相对较低,TN、TP 以及 PO_4^{3-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 浓度则相对较高;苏州河水体中 NH_4^+ 浓度变化不大,但下游水体的 TSS、TN、 NO_3^- 和 PO_4^{3-} 浓度均表现出上升趋势;受季节影响,两水体中的水温、DO、ORP 以及 BOD 均具有显著的季节波动($p < 0.01$),ORP 随着春、夏季水温升高而逐渐增加,而 DO、BOD 和 TSS 则在秋、冬季水温

下降时上升.此外,各水体中的 TN 与 NH_4^+ ($r = 0.536$), PO_4^{3-} 与 NO_3^- ($r = 0.538$), TSS ($r = 0.859$) 之间均表现出很高的相关性($p < 0.001$),但未表现出与水温的显著相关性,表明季节对这些指标的影响较小.

3.3 环境因子对周丛藻类的影响作用

表 1 黄浦江、苏州河各断面周丛藻类指示物种分析¹⁾

Table 1 Summary of indicator species analysis showing indicator taxa and indicator value for each periphyton-based river group classified using the UPGMA method

藻类名称	指示值						
	A	B	C	D	E	F	G
<i>Diatoma vulgare</i> Bory	47	18	3	0	0	20	12
<i>Melosira italica</i> (Ehr.) Kütz	27	22	5	9	17	19	0
<i>Dactylococcopsis acicularis</i> Lemm	52	36	13	0	0	0	0
<i>Leptosiropsis torulosa</i> Jao	66	34	0	0	0	0	0
<i>Navicula cincta</i> (Ehr.) Kütz	35	44	21	0	0	0	0
<i>Chroococcus minutus</i> (Kütz.) Næg	34	39	27	0	0	0	0
<i>Cyclotella antiqua</i> W. Smith	0	36	5	13	37	10	0
<i>Synedra amphicephala</i> Kütz	0	18	37	10	8	8	18
<i>Navicula cryptocephala</i> Kütz	0	7	10	34	26	10	13
<i>Cyclotella meneghiniana</i> Kütz	0	0	0	46	41	14	0
<i>Fragilaria capucina</i> Desm	0	0	0	7	22	46	25
<i>Gomphonema gracile</i> Ehr	0	0	0	16	19	65	0

1) 黑体字为显著指示值($p < 0.05$, Monte Carlo 序列检验),其中大写英文字母依次分别代表淀峰、松浦大桥、吴淞口,赵屯、黄渡、北新泾、浙江路桥采样断面

图 5 显示了周丛藻类种类组成与环境因子间的统计学关系. CCA 分析表明,共有 20 个环境因子参加计算,第 1、2 轴共解释了 21.7% 的藻类组成,其中第 1 轴解释了 11.3% 的周丛藻类变量. Monte Carlo 检验表明前 3 轴的分析结果具有显著的统计学意义($p < 0.01$),其特征值分别为 0.344、0.172 和 0.146. 物种-环境变量与前 3 轴的显著相关系数分别为 0.955、0.861 和 0.792.

在综合分析藻类组成及其环境影响因子相互关系的基础上,图 5 显示了黄浦江与苏州河中周丛藻类在受到水质等环境因子影响下,所表现出的显著差异:第 1 轴代表了从黄浦江到苏州河逐渐增加的水质分类梯度以及相应的水域功能区划梯度,黄浦江与苏州河各取样点分别位于第 1 轴的左右两侧. 水质分类($r = 0.871$)、水域功能区划($r = 0.949$)以及水质指标中 NH_4^+ ($r = 0.741$)、TN ($r = 0.533$) 浓度与第 1 轴呈显著正相关, DO ($r = -0.575$) 与第 1 轴呈负相关性(表 2),其中水质分类与水域功能区划间的相关性最大($r = 776$). 第 2 轴代表了水体中的营养物质浓度梯度, PO_4^{3-} ($r = 0.426$)、 NO_3^- ($r = 0.494$) 和 TSS ($r = 0.492$) 与第 2 轴成正相关,而 TP ($r = -0.466$) 与第 2 轴成负相关性.

在 CCA 分析的基础上,对各断面指示藻类与环境影响因子间的相关性进行分析(表 3). 结果表明,在黄浦江中上游区域具有较高指示能力的 7 个指示藻类主要受到 DO、N、P、水质分类、土地利用类型以及水域功能区划等共 7 个环境因子的影响,其中系带舟形藻(*Navicula cincta*)和微小色球藻(*Chroococcus minutus*)既与水质分类和水域功能区划具有极显著的负相关性($p < 0.01$),同时与 DO、 NH_4^+ 和 TN 具有较高的相关系数. 苏州河中具有较高指示值的 4 种藻类除受到以上各环境因子的影响外,还与水体中

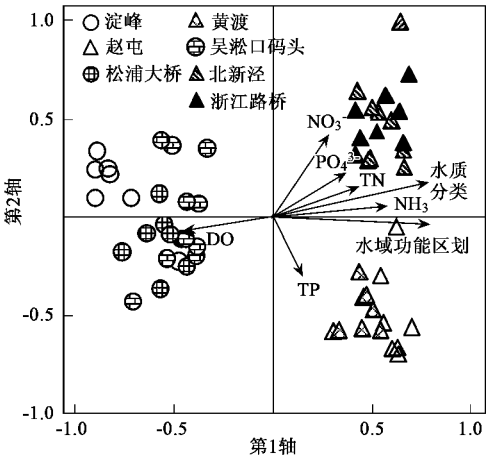


图 5 周丛藻类与环境变量相关性 CCA 排序

Fig.5 Ordination site plot of canonical correspondence analysis showing environmental variables identified by a forward selection method

表 2 环境变量与前 2 轴的相关系数¹⁾

Table 2 Correlation coefficients between selected environmental variables and the 1st two CCA axes		
环境变量	第 1 轴	第 2 轴
Temp	-0.068	-0.179
pH	-0.339	0.098
DO [*]	-0.575	-0.215
Chl-a	0.174	0.078
ORP	0.021	-0.240
NH ₄ ⁺	0.741	0.047
TN [*]	0.533	0.106
TP [*]	0.250	-0.466
COD	0.148	0.021
BOD	0.243	0.208
NO ₃ ^{-*}	0.195	0.494
PO ₄ ^{3-*}	0.433	0.429
TSS [*]	0.420	0.492
水质 [*]	0.871	0.382
水域功能区划 [*]	0.949	-0.070
土地利用类型	0.025	0.426

1) * 表示显著相关, $p < 0.05$

表 3 主要环境影响因子与周丛藻指示种类相关系数¹⁾

Table 3 Correlation coefficients between the selected environmental variables and indicator species of periphyton assemblages										
藻类名称	环境因子									
	DO	NH ₄ ⁺	TN	TP	BOD	PO ₄	TSS	水质分类	土地利用类型	水域功能区划
<i>Diatoma vulgare</i> Bory	0.19	-0.16	-0.07	-0.28 [*]	-0.02	-0.14	-0.04	-0.09	-0.17	-0.49 ^{**}
<i>Melosira italica</i> (Ehr.) Kütz	0.15	-0.16	-0.18	-0.10	0.05	-0.13	-0.02	-0.13	-0.26 [*]	-0.25 [*]
<i>Dactylococcopsis acicularis</i> Lemm	0.29 [*]	-0.30 [*]	-0.30 [*]	-0.13	-0.10	-0.21	-0.14	-0.35 [*]	-0.14	-0.47 ^{**}
<i>Leptosiropsis torulosa</i> Jao	0.22	-0.29 [*]	-0.30 [*]	-0.25 [*]	-0.10	-0.32	-0.22	-0.35 [*]	-0.29 [*]	-0.57 ^{**}
<i>Navicula cincta</i> (Ehr.) Kütz	0.33 [*]	-0.45 [*]	-0.34 [*]	-0.15	-0.22	-0.25	-0.19	-0.52 ^{**}	-0.08	-0.58 ^{**}
<i>Chroococcus minutus</i> (Kütz.) Näg	0.34 [*]	-0.56 [*]	-0.42 ^{**}	-0.15	-0.17	-0.23	-0.26 [*]	-0.63 ^{**}	0.01	-0.66 ^{**}
<i>Cyclotella antiqua</i> W. Smith	-0.05	0.01	-0.15	-0.13	0.09	-0.01	-0.06	-0.13	-0.33 [*]	0.02
<i>Synedra amphicephala</i> Kütz	0.00	-0.16	-0.03	-0.15	0.23	0.17	0.14	-0.12	0.30 [*]	0.03
<i>Navicula cryptocephala</i> Kütz	-0.06	0.12	0.06	0.03	0.25	0.07	0.02	0.13	-0.13	0.32 [*]
<i>Cyclotella meneghiniana</i> Kütz	-0.16	0.26 [*]	0.25	0.36 [*]	0.04	-0.13	-0.14	0.18	-0.34 [*]	0.39 [*]
<i>Fragilaria capucina</i> Desm	-0.18	0.30 [*]	0.26 [*]	-0.17	0.46 ^{**}	0.45 ^{**}	0.57 ^{**}	0.56 ^{**}	0.07	0.41 ^{**}
<i>Gomphonema gracile</i> Ehr	-0.19	0.38 [*]	0.26 [*]	-0.11	0.04	0.05	0.10	0.32 [*]	0.02	0.25

1) * 表示显著相关, $p < 0.05$; ** 表示极显著相关, $p < 0.01$

(2) 水质分类、水域功能区划和氮、磷等营养物质浓度是影响黄浦江、苏州河周丛藻类群落变化的主要环境因子,环境物理因子(如季节因素和水文学指标)对周丛藻类群落结构的影响较小。

(3) 一些具有较高优势度的藻类,如系带舟形藻(*Navicula cincta*)、微小色球藻(*Chroococcus minutus*)和钝脆杆藻(*Fragilaria capucina*)对水体中氮、磷浓度和水质条件变化敏感,可作为不同河段水质和氮、磷物质浓度变化的指示藻类。

致谢:本研究得到美国 Portland 州立大学环境科学与资源学院 Pan Yangdong 教授的热心指导,上海市环境科学研究院陈小华工程师及华东师范大学环科系许春梅同学在样品采集与分析过程中给予了

BOD、TSS 表现出显著的相关性,其中钝脆杆藻(*Fragilaria capucina*)与 BOD、PO₄³⁻、TSS、水质分类和水域功能区划均具有极显著的正相关性。

4 结论

(1) 受环境条件影响,上海地区主要水体中周丛藻类群落表现出时空变化趋势:周丛藻类群落在上游水质较好、人类活动干扰相对较少的区域,具有高多样性、大密度、种类数量丰富的特征,一些寡污带和弱中污带(β -中污带)藻类(如意大利直链藻、微小色球藻、普通等片藻和梅尼小环藻)在此区域表现出较高的优势度或指示能力,在下游水质较差、人类活动干扰频繁区域,藻类群落表现出种类结构单一、密度与种类数量下降的特征, α -中污带藻类(颤藻和扁裸藻)数量增加;两水体中的绿藻和裸藻群落均随春、夏季水温及磷、氮等营养物质浓度的增加而大量出现。

大力帮助,在此一并表示感谢。

参考文献:

[1] Stevenson R J. Epilithic and epipelic diatoms in the Sandusky River, with emphasis on species diversity and water pollution [J]. Hydrobiologia, 1984, 114: 161 ~ 175.

[2] Friedrich G, Chapman D, Beim A. The use of biological materials [A]. In: Chapman D. Water Quality Assessments [C]. London, UK: Chapman & Hall Ltd, 1992. 171 ~ 238.

[3] Stewart P M, Butcher J T, Gerovac P J. Diatom (*Bacillariophyta*) community response to water quality and land use [J]. Natural Areas Journal, 1999, 19: 155 ~ 165.

[4] Hill B H, Willingham W T, Parrish L P, et al. Periphyton community responses to elevated metal concentrations in a Rocky Mountain stream [J]. Hydrobiologia, 2000, 428: 161 ~ 169.

[5] 由文辉. 淀山湖着生藻类群落结构与数量特征[J]. 环境科学, 1999, **20**(5): 59 ~ 62.

[6] 廖祖荷, 顾詠洁. 苏州河着生生物群落结构的变化与水质的关系[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2003, **3**(3): 109 ~ 112.

[7] 胡显安, 王国庆, 李顺. 用着生藻类评价松花江佳木斯江段的水质状况 [J]. 黑龙江环境通报, 2003, **27**(1): 92 ~ 93.

[8] Yang X D, Wang S M, Xia W L, *et al.* Application of CCA for study on modern lake diatoms and environment in the Tibetan Plateau [J]. Science in China (Series D), 2001, **44**: 343 ~ 350.

[9] Nayar S, Goh B P L, Chou L M. Settlement of marine periphytic algae in a tropical estuary [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2005, **64**: 241 ~ 248.

[10] Leska S F, Cynthia G. Using diatoms to assess the biological condition of large rivers in Idaho (USA) [J]. Freshwater Biology, 2002, **47**: 2015 ~ 2037.

[11] 施玮, 吴和岩, 赵耐青, 等. 淀湖水水质富营养化和微囊藻毒素污染水平[J]. 环境科学, 2005, **26**(5): 55 ~ 61.

[12] 董函辉, 羊向东, 王荣, 等. 长江中下游地区湖泊硅藻-总磷转换函数[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(1): 1 ~ 12.

[13] 王翠红, 张金屯. 汾河水库水源河着生硅藻群落的 DCCA 研究[J]. 中国环境科学, 2004, **24**(1): 28 ~ 31.

[14] 苏胜齐, 沈益绿, 姚维志. 菹草着生藻类的群落结构与数量特征初步研究[J]. 西南农业大学学报, 2002, **24**(3): 254 ~ 258.

[15] 杨红军, 袁峻峰, 张锦平. 着生藻类群落在黄浦江水质监测中的应用[J]. 上海环境科学, 2002, **21**(11): 686 ~ 693.

[16] 顾詠洁, 王秀芝, 廖祖荷. 利用着生生物群落动态变化监测水质的研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2005, **4**: 87 ~ 94.

[17] Pan Y D, Hill B H, Husby P, *et al.* Relationships between environmental variables and benthic diatom assemblages in California Central Valley streams (USA)[J]. Hydrobiologia, 2006, **561**: 119 ~ 130.

[18] Christopher E W, Pan Y D. Using diatom assemblages to assess urban stream conditions [J]. Hydrobiologia, 2006, **561**: 179 ~ 189.

[19] Biggs B J F. Biomonitoring of organic pollution using periphyton, South Branch, Canterbury, New Zealand [J]. New-Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 1989, **3**: 263 ~ 274.

[20] 陈一申, 吴国豪. 苏州河水环境污染现状分析[J]. 上海环境科学, 1997, **16**(1): 11 ~ 14.

[21] 匡桂云, 张效国. 苏州河整治的阶段性成果[J]. 净水技术, 2001, **20**(1): 7 ~ 9.

[22] 上海市环境质量报告书(2001 ~ 2005 年)[R]. 上海: 上海市环境保护局, 2006.

[23] 上海市生态环境现状调查[R]. 上海: 上海市环境保护局, 2004.

[24] 沈蕴芬, 章宗涉. 微生物监测新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.

[25] 韩茂森, 束蕴芳. 中国淡水生物图谱[M]. 北京: 海洋出版社, 1995.

[26] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[27] Christine L W, Yang D P. Diatom Assemblages and their Associations with Environmental Variables in Oregon Coast Range Streams, USA[J]. Hydrobiologia, 2006, **561**: 207 ~ 219.

[28] 刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 263 ~ 268.

[29] Shannon C E, Weaver W. The Mathematical Theory of Communication [M]. Urbana: University of Illinois Press, 1949.

[30] Hall I H, Smol A J. A Weighted -averaging regression and calibration model for inferring total phosphorus concentration from diatoms in British Columbia (Canada) lakes [J]. Freshwater Biology, 1995, **27**: 417 ~ 434.

[31] Bennion H. A diatom-phosphorus transfer functions for shallow, eutrophic ponds in southeast England [J]. Hydrobiologia, 1994, **275**: 391 ~ 410.

[32] Dufrene M, Legendre P. Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach [J]. Ecological Monographs, 1997, **67**: 345 ~ 366.

[33] Jongman R H G, Ter Braak C J F, Van O F R T. Data Analysis in Community and Landscape Ecology [M]. Wageningen: Center for Agricultural Publishing and Documentation, 1987.

[34] Hope A C A. A simplified Monte Carlo significance test procedure [J]. Journal of the Royal Statistical Society, Series B, 1968, **30**: 582 ~ 598.

[35] McCune B, Mefford M J. PC-ORD Multivariate Analysis of Ecological Data, [M]. Version 4. Oregon, Gleneden Beach: MjM Software Design, 1999.

[36] 上海市地表水环境功能区划[R]. 上海: 上海市环境保护局, 2000.

[37] GB 3838-88. 地表水环境质量标准[S].

[38] Ren W W, Zhong Y, Meligrana J, *et al.* Urbanization, land use, and water quality in Shanghai 1947-1996 [J]. Environment International, 2003, **29**: 649 ~ 659.

[39] Dodds W K, Jones J R, Welch E B. Suggested classification of stream trophic state: distributions of temperate stream types by chlorophyll, total nitrogen, and phosphorus [J]. Water Research, 1998, **32**: 1455 ~ 1462.