

尚湖浮游植物时空变化特征及影响因素分析

杨金艳¹, 徐 勇¹, 高晓平¹, 张舒雯¹, 朱德龙²

(1. 江苏省水文水资源勘测局苏州分局, 江苏 苏州 215129;

2. 江苏省太湖地区水利工程项目管理处, 江苏 苏州 215128)

摘要: 2016 年对常熟市重要饮用水源地尚湖开展了 4 个季度的浮游植物监测与分析, 结果表明: 4 个季节采样定量检测到尚湖浮游植物 8 门 79 属 141 种, 其中绿藻(56 种)、蓝藻(33 种)和硅藻(32 种)为物种数较多的门类, 主要优势种属有水华束丝藻、肘状针杆藻、梅尼小环藻、颗粒直链藻、狭细颤藻、极细微曲壳藻等; 全湖藻类密度与生物量大小按季节排序均为夏季>冬季>秋季>春季; 尚湖不同湖区浮游植物群落结构的关键影响因子存在差异, DO、TN 和 SD 对于取水口所在的东南半湖浮游植物群落结构变化有关键的影响作用, 在西北半湖, TP 和 NH₃-N 对浮游植物群落结构变化具有更关键的影响。

关键词: 浮游植物; 优势物种; 密度; CCA 分析

中图分类号: TV663

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839 (2017) 12-0001-06

Analysis on temporal and spatial variation characteristics and influence factors of phytoplankton in Shang Lake

YANG Jinyan¹, XU Yong¹, GAO Xiaoping¹, ZHANG Shuwen¹, ZHU Delong²

(1. Suzhou Hydrology and Water Resources Investigation Bureau of Jiangsu Province, Suzhou 215129, Jiangsu;

2. Taihu Lake Region Hydraulic Project Management Division of Jiangsu Province, Suzhou 215128, Jiangsu)

Abstract: In 2016, four seasons of phytoplankton monitoring and analysis were carried out in Shang Lake, which was an important drinking water source in Changshu City. The results showed that there were 141 species belonging to 79 genera of 8 phytoplankton species in four seasons, mainly including 56 species of green algae, 33 species of cyanobacteria and 32 species of diatoms. The main dominant species were aphanizomenon flosaquae, synedra ulna, cyclotella meneghiniana, melosira granulata (Ehr.) Ralfs., etc. The density and biomass of the whole lake sorted by season were summer > winter > autumn > spring. There were differences in the key impact factors of phytoplankton community structure in different lake areas of Shang Lake. DO, TN and SD played a key role in the structural changes of phytoplankton community in the southeastern half of the lake, while TP and NH₃-N played a more important role on the phytoplankton community in the northwestern half of the lake.

Key words: phytoplankton; dominant species; density; CCA analysis

收稿日期: 2017-10-16

基金项目: 国家水体污染控制与治理技术重大专项(2018ZX7208-004); 江苏省水利科技基金项目(2016042)

作者简介: 杨金艳(1977-), 女, 本科, 高级工程师, 主要从事水文水资源研究工作。

浮游植物是水体营养等级的重要指示生物, 水体理化因子的变化直接或间接地影响群落结构演替、种类组成和数量变化, 其群落结构、生物多样性指数等常常被作为表征水环境状况的重要指标^[1-3], 某些特定浮游植物种类与演替可体现水体营养水平及其变化规律。尚湖是常熟市重要的集中式饮用水源地(常熟市第二水厂), 同时也是地区重要生态旅游名片, 深入调查、分析尚湖浮游植物群落结构特征和季节演替规律, 探讨关键水质影响因素, 对于地区饮用水保障及湖泊健康管理具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 湖泊概况

尚湖地处常熟城西, 虞山之南, 紧靠西三环路, 呈带状傍山而居, 并与古城毗邻, 距离城市中心约 4 km, 东经 $120^{\circ} 39'54'' \sim 120^{\circ} 43'08''$ 、北纬 $31^{\circ} 37'34'' \sim 31^{\circ} 40'22''$ 之间。尚湖属于陆源湖类型, 东西长 6.5 km, 中间南北宽 1.6 km, 宽度由中间向两头逐渐变小, 其湖盆呈一不规则的椭圆形, 实测尚湖平均湖盆高程为 -1.601 m, 最低湖盆高程为 -4.75 m (不包括尚湖风景区内被分隔成各个池塘的湖泊水域部分)^[4]。尚湖以湖中央的穿湖大堤为界, 尚湖东南半湖的湖盆较浅, 西北半湖的湖盆较深。尚湖有入湖河流 2 条, 分别为西北角的张墓塘东北部的张家港, 均设有控制闸与尚湖相连。经长期的严格管理, 目前尚湖已成为常熟重要的湿地资源景区, 在提供水资源、调节气候、涵养水源、渔业养殖、保护生物多样性等多方面发挥了重要作用。

1.2 采样点分布及分析方法

2016 年 4 月(春季), 8 月(夏季)、10 月(秋季)和 12 月(冬季), 依据湖区及周边环境, 依照尚湖流势, 从东南向西北方向, 在湖体内设采样点 5 个(见图 1), SH1、SH2 位于东南半湖, SH3、SH4 和 SH5 位于西北半湖, 其中 SH1 相邻常熟市第二水厂取水口。

浮游植物定量分析样品为现场采集 1 L 表层湖水, 加入 15 ml 鲁哥氏剂固定, 带回实验室浓缩至 30 ml 后进行镜检分析^[5-6]; 定性样品采用 25 号浮游生物网拖曳富集分析。取样时同步测定各采样点溶解氧(DO)、透明度(SD)和水温(WT),

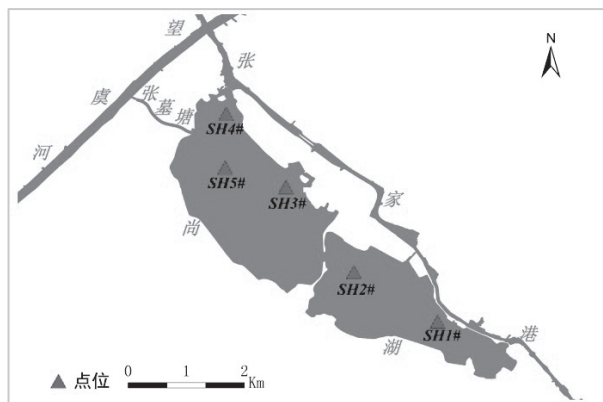


图 1 尚湖采样点分布

同时取水样回实验室测定主要营养水平指标总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)高锰酸盐指数(CODMn)和叶绿素 a (Chl-a)。

数据处理采用 Microsoft Excel 软件, 另采用典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA)解析浮游植物群落分布与环境因子间的关系。

2 结果与分析

2.1 浮游植物群落组成时空变化

(1) 物种组成变化

2016 年调查期间, 共定量检出浮游植物 79 属 141 种, 分属于蓝藻、硅藻、甲藻、金藻、隐藻、裸藻和绿藻 8 门, 其中绿藻(种类数为 56 种, 占物种数 39.72%)、蓝藻(33 种, 占 23.4%)、硅藻(32 种, 占 22.7%)为物种数多的门类, 裸藻为 8 种(占物种数 5.67%), 黄藻、金藻和甲藻仅在个别采样季节及少数采样站点出现, 其中金藻和隐藻各境检出 4 种, 甲藻为 3 种, 黄藻 1 种。

各季节浮游植物种类数分布(见图 2), 呈现较明显差异: 秋季物种数量最大, 为 87 种; 夏季和春季次之, 分别为 67 种和 62 种, 冬季物种数最低, 为 38 种; 各季节均以绿藻门物种数最大, 冬季绿藻门物种数偏低; 蓝藻门物种数各季节差异明显, 低温季节的春季和冬季蓝藻门物种数少, 夏季和秋季物种数明显增大。

(2) 浮游植物密度、生物量季节演变

不同季节季湖泊藻类密度差异较大, 春、夏、秋和冬季全湖藻类密度分别为 $0.64 \times 10^6 \text{ L}^{-1}$ 、 $9.9 \times 10^6 \text{ L}^{-1}$ 、 $2.76 \times 10^6 \text{ L}^{-1}$ 和 $6.21 \times 10^6 \text{ L}^{-1}$, 春季密度最小, 夏季最大; 春季以硅藻门密度占优, 为

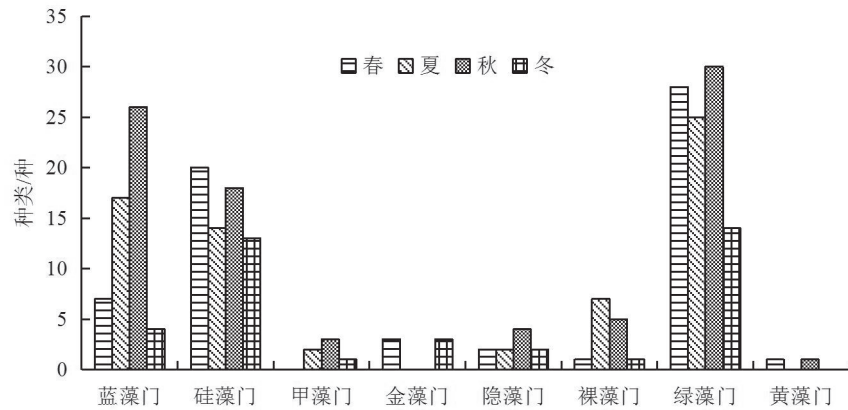


图 2 尚湖各季浮游植物种属数组成

$0.34 \times 10^6 \text{ L}^{-1}$, 占总密度 53.85%, 其次为绿藻门和蓝藻门, 分别占总密度 31.15% 和 8.08%; 夏季以蓝藻门密度最大, 为 $3.45 \times 10^6 \text{ L}^{-1}$, 占总密度 34.89%, 其次为绿藻门和硅藻门, 分别占总密度 22.05% 和 8.32%; 秋季以绿藻门密度最大, 为 $1.05 \times 10^6 \text{ L}^{-1}$, 占总密度 37.99%, 其次为蓝藻门, 占总密度的 28.79%; 冬季则以硅藻门密度明显占优, 为 $3.77 \times 10^6 \text{ L}^{-1}$, 占总密度 60.68%。综合分析, 春、夏、秋、冬四季中藻类优势密度门类主要为硅藻、蓝藻和绿藻。但不同季节间存在明显差异, 春季和冬季均以硅藻门占据优势密度地位, 而夏、秋两季主要以蓝藻和绿藻门密度较大。由图 3 可知, 湖内不同藻类密度优势地位季节间变化特征为: 由春季至夏季, 湖泊蓝藻密度比例明显增大, 由夏季至秋、冬季, 蓝藻密度比例逐渐减小; 硅藻则与蓝藻变化规律相反, 由春季至夏季密度比例明显减小, 由夏季至秋、冬季, 密度比例逐渐增大; 绿藻门密度比例在春、夏、秋季逐渐小幅度增长, 至冬季则明显减小。

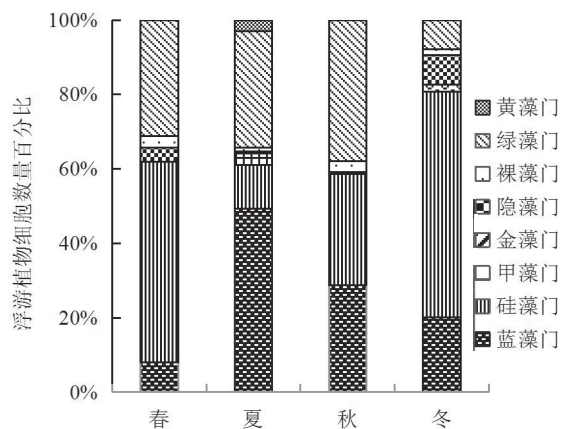


图 3 尚湖各季浮游植物密度百分比组成

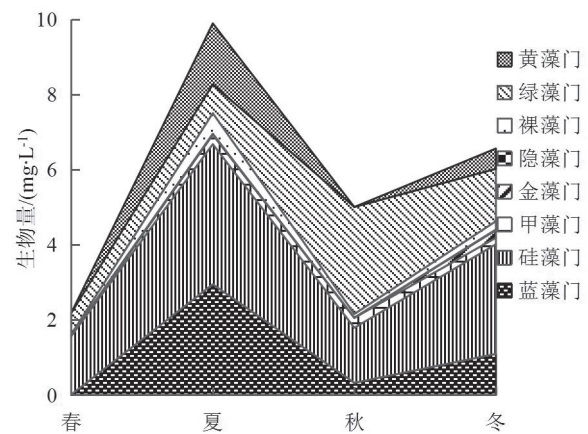


图 4 尚湖各季浮游植物生物量组成

由于不同藻类个体大小的不同, 不同季节藻类生物量与密度的变化趋势存在差异 (见图 4)。夏季的平均总生物量为全年最高, 为 9.89 mg/L, 其中硅藻门生物量高达 3.73 mg/L, 占总生物量 37.7%。春季的平均总生物量最低, 只有 2.18 mg/L, 其中硅藻门生物量为 1.56 mg/L, 占总生物量比例最高为 71.56%。秋季和冬季的总生物量相差不大, 分别为 5 mg/L 和 6.36 mg/L, 秋季绿藻门生物量比例最高, 占总生物量 56.88%, 冬季硅藻门生物量最高, 为 2.92 mg/L, 占总生物量 45.91%。

春季定量检出浮游植物共 5 门 37 属 62 种, 主要由硅藻 (占总密度的 53.85%), 绿藻 (31.15%), 蓝藻 (8.08%) 组成, 优势种属依次为梅尼小环藻、湖生卵囊藻、尖针杆藻、狭细颤藻、尖头舟形藻、偏心圆筛藻; 夏季为 7 门 47 属 67 种, 主要由蓝藻 (占总密度的 34.89%)、绿藻 (22.05%)、硅藻 (8.32%) 组成, 主要优势种属为水华束丝藻、肘状针杆藻、颗粒直链藻、单角盘星藻具孔变种和梅尼小环藻; 秋季为 6 门 56 属 87 种, 主要由绿藻 (占总密度的

37.99%)、硅藻(29.81%)、蓝藻(28.79%)组成,优势种属依次为颗粒直链藻、尖针杆藻、狭细颤藻、水华束丝藻和梅尼小环藻;冬季为5门31属38种,主要由硅藻(占总密度的60.68%组成)、蓝藻(20.12%)、隐藻(7.99%)组成,优势种属为极细微曲壳藻、肘状针杆藻、狭细颤藻、梅尼小环藻、啮蚀隐藻和颗粒直链藻。全年统计,优势种属为水华束丝藻、肘状针杆藻、梅尼小环藻、颗粒直链藻、狭细颤藻以及极细微曲壳藻。

(3) 浮游植物群落组成空间变化

统计不同季节尚湖各点位的藻类密度与生物量(见表1),各点位不同类别藻类密度分布(见图5)。春季各点位藻类密度和生物量均较低,总体均以SH1最大;各点位均以硅藻密度优势最大,其次为绿藻门。夏季各点位藻类密度和生物量均差异较大,位于东南半湖的SH1和SH2密度和生物量均明显小于位于西北半湖的SH3、SH4和SH5;且SH1和SH2均以蓝藻门密度占明显优势,而位于

表 1 尚湖不同点位浮游植物密度和生物量时空分布

	春季		夏季		秋季		冬季		年均	
	密度 (10^6 L^{-1})	生物量 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	密度 (10^6 L^{-1})	生物量 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	密度 (10^6 L^{-1})	生物量 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	密度 (10^6 L^{-1})	生物量 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	密度 (10^6 L^{-1})	生物量 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
SH1	0.78	3.29	8.04	5.38	2.89	9.28	9.77	7.81	5.37	6.94
SH2	0.69	2.34	4.61	3.89	2.02	3.17	7.82	5.52	3.78	6.84
SH3	0.55	2.34	9.88	12.94	2.38	5.06	4.53	5.02	4.33	4.23
SH4	0.60	1.70	12.66	13.01	2.96	3.80	4.58	4.97	5.20	6.37
SH5	0.56	2.01	14.31	14.23	3.55	3.71	4.34	5.07	5.69	6.75

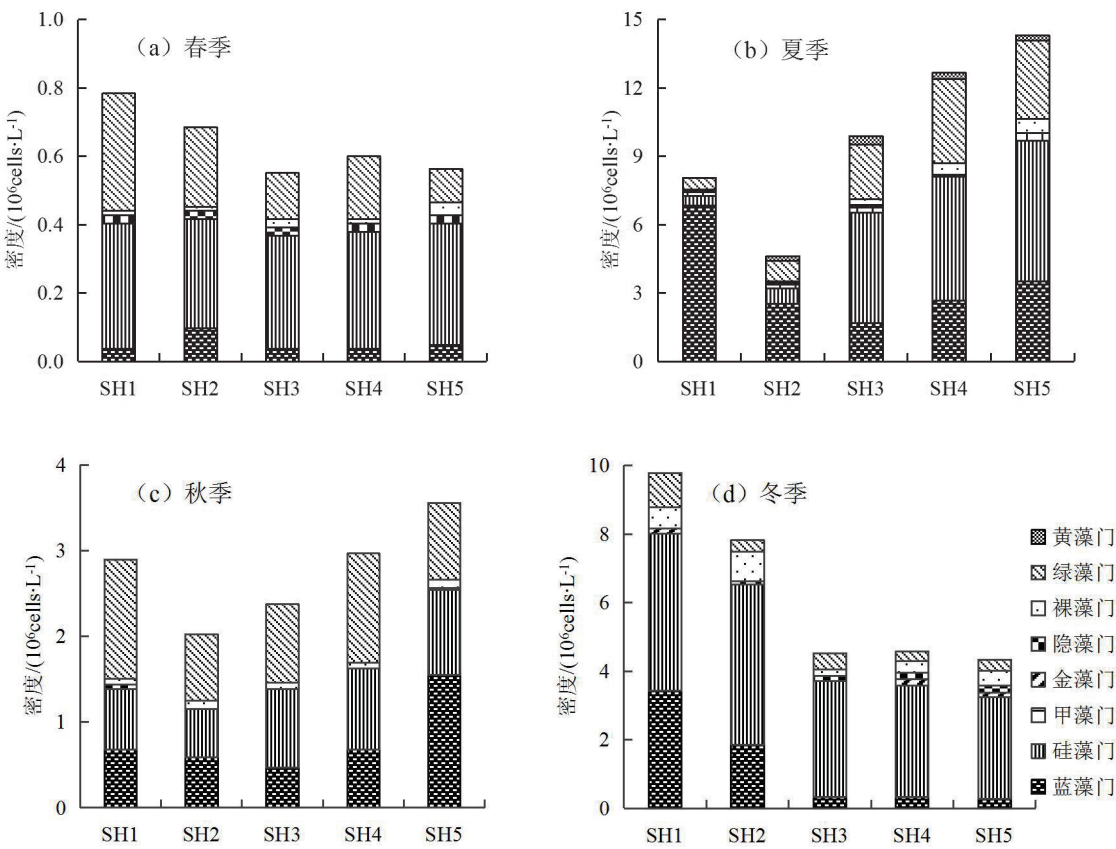


图 5 尚湖浮游植物密度组成时空分布

西北半湖的 3 个点位均以硅藻密度占优, 其次为绿藻和蓝藻。秋季各点位藻类密度与生物量差异也较大, 其中密度以 SH5 最大, 生物量则以 SH1 最大; 尽管各点位均以蓝藻、绿藻和硅藻密度占优, 但密度比例存在差别, 如 SH5 以蓝藻密度占优, SH1 则以绿藻密度比例大。冬季各点位藻类密度差别较大, 位于东南半湖的 SH1 和 SH2 藻类密度明显大于西北半湖的 3 个点位; 尽管各点位均以硅藻门密度占优, 但 SH1 和 SH2 蓝藻门密度比例也较大。

尚湖浮游植物种群空间分布也存在差异。全年统计, SH1 与 SH2 优势种属分布较为接近, 主要以水华束丝藻、狭细颤藻、肘状针杆藻, 梅尼小环藻、极细微曲壳藻、点形裂面藻及嗜噬隐藻等为优势种; 蓝藻门的优势种主要在夏季和秋季密度较大, 其中水华束丝藻夏季密度分别为 $6.07\times10^6\text{ L}^{-1}$ 和 $1.93\times10^6\text{ L}^{-1}$; 硅藻门优势种密度主要在冬季较大, 其中肘状针杆藻冬季密度分别为 $1.29\times10^6\text{ L}^{-1}$ 和 $1.53\times10^6\text{ L}^{-1}$ 。SH3 优势种属依次为肘状针杆藻、颗粒直链藻、梅尼小环藻、狭细颤藻、水华束丝藻和尖针杆藻, 硅藻门优势度全年均较高, 但各季节优势种属存在差别, 如夏季和冬季肘状针杆藻优势度最大, 密度分别为 $3.71\times10^6\text{ L}^{-1}$ 和 $1.43\times10^6\text{ L}^{-1}$, 春季和秋季均以梅尼小环藻优势度较大, 密度分别为 $0.2\times10^6\text{ L}^{-1}$ 和 $1.43\times10^6\text{ L}^{-1}$, 颗粒直链藻则在四季密度分布较为均衡。SH4 和 SH5 优势种属分布相近, 均以肘状针杆藻、颗粒直链藻、水华束丝藻、梅尼小环藻、

狭细颤藻和单角盘星藻具孔变种为优势种, 春季 2 个点位均以梅尼小环藻优势大, 但总体密度较低, 分别为 $0.22\times10^6\text{ L}^{-1}$ 和 $0.23\times10^6\text{ L}^{-1}$; 夏季肘状针杆藻、水华束丝藻、单角盘星藻具孔变种和颗粒直链藻优势度均较大(密度值均大于 $1\times10^6\text{ L}^{-1}$), 其中肘状针杆藻密度分别为 $3.44\times10^6\text{ L}^{-1}$ 和 $3.91\times10^6\text{ L}^{-1}$ 。各点位优势物种分布(见表 2)。

2.2 浮游植物群落结构环境影响因子分析

为探明环境因子对尚湖浮游植物群落结构的影响, 考虑对尚湖浮游植物优势物种密度数据与主要环境因子进行 CCA 分析。以基于 4 个季节调查确定的尚湖 9 个浮游植物优势物种密度作为响应变量, 考虑 DO、SD、TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 以及 Chl-a 等水质理化指标作为解释变量, 分析水体理化因子对尚湖浮游植物优势群落分布的解释作用。CCA 分析结果(见图 6), CCA 分析中的横轴 1 和竖轴 2, 对浮游植物环境和物种的累积解释率为 67.1%, 对环境因子和点位关系的累积解释率为 71.2%。在排序图中, 第一轴以 SD 为主, SD 与轴 1 的相关系数是 0.93, 第二轴以 Chl-a 为主, Chl-a 与轴 2 的相关系数是 0.47。在浮游植物环境和物种的 CCA 分析图中, 除点形裂面藻和单角盘星藻具孔变种外, 水华束丝藻、梅尼小环藻、狭细颤藻、极细微曲壳藻、肘状针杆藻及变种、尖针杆藻与 TN 和 SD 均为正相关关系。TP 对单角盘星藻具孔变种影响较大, DO 对点形裂面藻影响较大。从尚湖环境因子对点位的影响来看, SH4 和 SH5 主要受 TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 影响较大, SH1 受 DO

表 2 尚湖不同点位浮游植物优势物种分布

优势物种	SH1	SH2	SH3	SH4	SH5
水华束丝藻 <i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	+	+	+	+	+
梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>	+	+	+	+	+
狭细颤藻 <i>Oscillatoria tenuis</i>	+	+	+	+	+
极细微曲壳藻 <i>Achnanthes minutissima</i>	+	+			
肘状针杆藻 <i>Synedra ulna</i>	+	+	+	+	+
点形裂面藻 <i>Merismopedia punctata</i>	+				
嗜噬隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i>		+			
颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>			+	+	+
尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>			+		
单角盘星藻具孔变种 <i>Pediastrum simplex</i> var. <i>duodenarium</i>				+	+

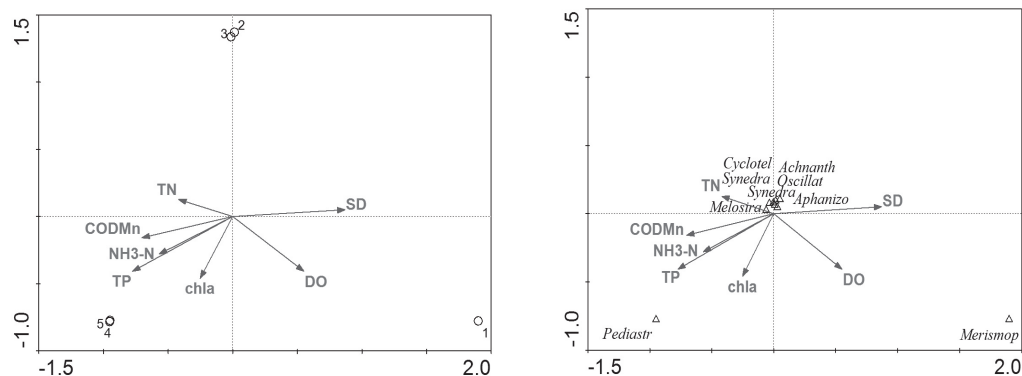


图 6 尚湖浮游植物优势物种与环境因子的 CCA 分析

影响较大。SH2、SH3 均与 TN、SD 呈正相关。可见总体上,尚湖不同湖区,环境影响因子及其作用存在差异,DO、TN 和 SD 对于东南半湖浮游植物群落结构变化有关键的影响作用,尤其是 SH1 点,夏季蓝藻门密度较大,可见 DO 对蓝藻密度的影响具有更关键的作用;在西北半湖,TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 对浮游植物群落结构变化具有更关键的影响。

3 结论

2016 年 4 个季节调查,共定量检测到尚湖浮游植物 8 门 79 属 141 种,其中绿藻 56 种,蓝藻 33 种,硅藻 32 种,裸藻 8 种,金藻和隐藻各为 4 种,甲藻为 3 种,黄藻 1 种;不同季节和湖区物种结构存在差异,主要优势种属有水华束丝藻、肘状针杆藻、梅尼小环藻、颗粒直链藻、狭细颤藻、极细微曲壳藻、点形裂面藻、啮噬隐藻、尖针杆藻和单角盘星藻具孔变种等。

不同季节和湖区藻类群落分布存在差异,全湖藻类密度与生物量大小按季节排序均为夏季>冬季>秋季>春季;春季各湖区点位均以硅藻密度优势最大,其次为绿藻门;夏季东南半湖以蓝藻门密度占明显优势,而西北半湖均以硅藻密度占优,绿藻和蓝藻密度也较大;秋季各湖区藻类密度与生物量差异也较大,西北半湖的 SH5 以蓝藻密度占优,东南半湖的 SH1 以绿藻密度比例

大;冬季各湖区均以硅藻门密度占优,东南半湖的藻类密度及蓝藻门密度均明显大于西北半湖。

不同湖区浮游植物群落结构的关键影响因子存在差异,东南半湖影响浮游植物群落结构分布的关键因子为 DO、TN 和 SD,西北半湖受 TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的影响更大。

参考文献:

- [1] 王艺兵,侯泽英,叶碧碧,等.鄱阳湖浮游植物时空变化特征及影响因素分析[J].环境科学学报,2015,35(5):1310-1317.
- [2] 王丽卿,施荣,季高华,等.淀山湖浮游植物群落特征及其演替规律[J].生物多样性,2011,19(1):48-56.
- [3] Belaoussoff S, Kevan P G, Murphy S, et al. Assessing tillage disturbance on assemblages of ground beetles (Coleoptera:Carabidae) by using a range of ecological indices[J]. Biodiversity and Conservation, 2003, 12(5):851-882.
- [4] 常熟市水利局,江苏省水文水资源勘测局苏州分局.常熟市尚湖资料整编成果[R].2012(11).
- [5] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法(第4版)[M].北京:中国环境科学出版社.2002.
- [6] 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.

(责任编辑:华智睿)