贡湖浮游植物时空分布特征及其与环境因子的关系

王 震， 邹 华*， 杨桂军， 许慧萍
（江南大学 环境与土木工程学院，江苏 无锡 214122）

摘要：为了弄清贡湖生态环境特征，基于 2013 年 3 月至 2014 年 2 月间贡湖 8 个采样点水环境状况的监测数据，运用数理统计分析手段，对浮游植物时空分布特征及其与环境因子的相关性进行了分析。贡湖总体上处于富营养化状态，而水源地附近水环境状况相对较好。蓝藻水华易发期水质透明度、悬浮物、叶绿素 a 、亚硝态氮、总氮时空分布差异显著(ANOVA ，$p < 0.05$)。浮游植物细胞密度的空间分布差异显著(ANOVA ，$p < 0.05$)，浮游植物细胞密度的最高值出现在 2 号点，最低值出现在 5 号点。利用 Pearson 相关性分析法分析藻细胞密度与环境因子间的关系，表明藻细胞密度与总氮、总磷、高锰酸盐指数、悬浮物、叶绿素 a 呈极显著相关，与溶解氧呈极显著负相关。利用冗余度分析(redundancy analysis，RDA) 浮游植物种类组成与环境因子之间的关系，表明营养盐(总氮、总磷和氨氮)、高锰酸盐指数、水温、悬浮物、pH 是影响浮游植物组成的主要因素。贡湖水生态环境特征存在显著的空间特征异质性。浮游植物群落结构组成受到水环境特征和空间相邻性的双重影响。

关键词：水源地；浮游植物；环境因子；相关性
中图分类号：X 52　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673—1689(2016)04—0399—09

Spatial-Temporal Characteristics of Phytoplanktons and the Relationship with Environmental Factors in the Gonghu Bay

WANG Zhen， *ZOU Hua**， *YANG Guijun*， *XU Huiping*
（School of Environment and Civil Engineering，Jiangnan University，Wuxi 214122，China）

Abstract：The spatial-temporal characteristics of phytoplanktons and its relationship with environmental factors were studied to understand the ecological environment characteristics，using multivariate statistical analysis based on the monitoring data recorded from March 2013 to February 2014 in the Gonghu Bay. Gonghu Bay was generally in a eutrophic state; however，the nearby sampling sites were in a relative better condition. The significant spatial-temporal characteristics was observed for the transparency，suspended substance，chlorophyll a，nitrite and the total nitrogen during cyanobacteria bloom (ANOVA，$p < 0.05$). A comparatively high spatial heterogeneity was indicated in the phytoplankton community composition (ANOVA，$p < 0.05$). The maximum cell density was found in the 2nd sampling site，while the minimum in the 5th sampling site. Pearson

收稿日期：2014-11-20
基金项目：国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2012ZX07503-002-01)。
* **通信作者**：邹 华(1972—)，男，江苏无锡人，工学博士，副教授，主要从事天然水体污染控制和环境生物技术研究。
E-mail：zouhua@jiangnan.edu.cn

correlation analysis was performed to illustrate the relationship between algae density and environmental variables. Significant positive correlations were found between algae density and the total nitrogen, total phosphorus, permanganate index, suspended substance, and chlorophyll a. But the correlations between algae density and dissolved oxygen were highly negative. Relationship between phytoplankton community composition and environmental factors were analyzed by redundancy analysis (RDA). The results indicated that nutrients (i.e., the total nitrogen, total phosphorus and ammonia nitrogen), permanganate index, water temperature, suspended substance, and pH made a major contribution to the composition of phytoplankton community. There was a remarkable spatial heterogeneity of ecological environmental in Gonghu Bay. The phytoplankton community composition was substantially and cooperatively affected by the environmental characteristics and adjacent sampling sites.

Keywords: drinking water source, phytoplankton, environmental factors, correlation

湖泊富营养化已成为我国乃至全球共同面临的最重要的水环境问题之一,由此而产生的水华已经给人们的生产生活及经济发展带来了巨大的影响[1]。每当水华暴发时,蓝藻等浮游植物在水体表面大量聚集,使得水体中溶解氧迅速降低、透光性变差,导致鱼类大量死亡和水生植物多样性下降;同时能产生藻毒素等[2-3]有毒有害物质及散发出恶臭等气味,严重危害饮用水安全和破坏水体景观。目前,我国已经有很多水域出现不同程度的蓝藻水华,包括太湖[4]、巢湖[5]、滇池[6]等。

近年来,Chen 等[7]研究了作为饮用水源地的太湖梅梁湾在历经为期 3 年的生态修复后,水质改善与浮游植物的响应;沈强[8]等对浙江省 4 座大中型水库水源地的的浮游生物现状进行了调查,并采用浮游生物完整性指数(P-IBI)评价水源地富营养化、藻类水华风险程度等水生态健康状况;李钦钦[9]等分析了太湖金墅湾水源地春、夏季浮游植物的种类组成、数量和分布等特征,探讨了浮游植物群落结构特征与水质污染的关系,但缺少太湖水源地浮游植物与环境因子的季节性研究。

贡湖是太湖北部三大湖湾之一,是无锡和苏州主要供水水源地之一,集中了苏锡两市 4 个水厂。贡湖中浮游植物的种类、数量的变化直接影响到两市的供水能力和供水质量。作者基于 2013 年 3 月至 2014 年 2 月间在贡湖 8 个监测点进行逐月野外定点水环境状态调查,分析贡湖浮游植物群落结构组成与季节演替过程,揭示影响贡湖浮游植物细胞密度及群落结构的环境因子,为弄清贡湖生态环境特征提供参考。

1 材料与方法

1.1 采样方法与分析方法

自 2013 年 3 月至 2014 年 2 月,在贡湖主要水源地分布区(#1、#4、#6)、入湖河口附近水域(#2、#3、#5、#7)及湾口(#8)设置采样点,并在每月月中对此 8 个采样点进行定点采样(图 1)。用上、下底均有阀门的 5 L 有机玻璃采水器采集水面下 0.5 m 的和离水底 0.5 m 的混合水样;采集的水样 24 h 内进行各指标的测定。同时,用采水器采集 1 L 水样,并用 10 mL 鲁哥氏液固定水样,用于浮游植物的鉴定。此外,现场测定指标包括:透明度(赛氏圆盘法),水温(WT)、pH 和溶解氧(DO)(YSI-6600 多参数水质仪)。

采集的水样分析指标主要有:亚硝态氮(NO_2^--N)、硝态氮(NO_3^--N)、氨氮(NH_4^+-N)、总氮(TN)、磷酸盐(PO_4^{3-})、总磷(TP)、高锰酸盐指数(CODMn)、悬浮物(SS)、叶绿素 a(Chla)。高锰酸盐指数采用酸性高锰酸钾法测定。悬浮物采用重量法测定。Chla 的测定采用丙酮萃取分光光度法[10]。亚硝态氮、硝态氮、氨氮、总氮、磷酸盐、总磷均使用 AutoAnalyzer 3 (AA3)连续流动分析仪进行测定。测定浮游植物的水样经 48 h 静置沉淀后,利用虹吸轻轻吸掉上清液,浓缩至 50 mL。不同门类的藻类鉴定与计数参照文献[11]。

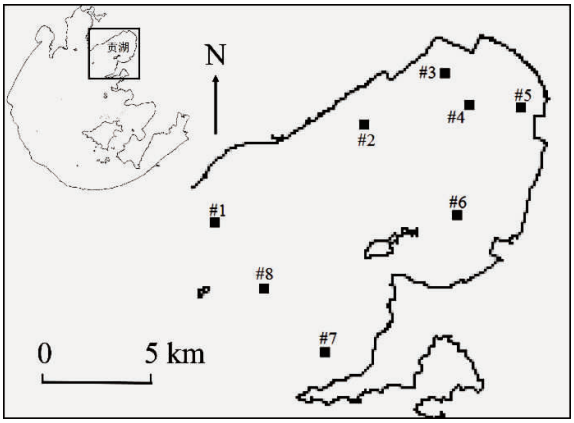


图 1 太湖贡湖湾采样点分布图

Fig. 1 Sampling sites in the Gonghu Bay of Taihu Lake

1.2 生物学评价方法

采用种类相似性指数(Jaccard 指数,J)对样点间浮游植物群落结构的相似性进行评价:

$$J=\frac{C}{(a+b-c)}$$

式中,J 为相似性指数;a 为样本 A 的种类数;b 为样本 B 的种类数;c 为样本 A 和 B 共有种类数。

当 $0<J<0.25$ 时,极不相似;当 $0.25\leqslant J<0.50$ 时,中等不相似;当 $0.50\leqslant J<0.75$ 时,中等相似;当 $0.75\leqslant J<1.00$ 时,极相似[12]。

1.3 数据统计分析

数据统计分析和作图使用 Excel、Origin 8.0、SPSS 20.0 和 CANOCO 4.5 软件。

藻细胞密度与环境因子间的关系采用 Pearson 相关分析法。聚类分析方法采用目前广泛应用的系统聚类[13],从而可以划分出贡湖水生态环境的特征水域。

由于监测指标的单位不完全相同,在进行聚类分析时,为了消除量纲的影响,对原始数据进行标准化,公式如下:

$$X_{ij}=\frac{(S_{ij}-\overline{S}_j)}{\sqrt{\sum(S_{ij}-\overline{S}_j)^2/(n-1)}}$$

式中,X_{ij} 为变量标准化之后的第 i 个采样点的第 j 个指标的数值,S_{ij} 为原始数据,$\overline{S}_j$ 为第 j 个指标的均值。

首先用 CANOCO 软件进行去趋势对应分析(detrended correspondence analysis,DCA),结果显示“Lengths of gradient”最大梯度为 1.674,故选择冗余度分析(redundancy analysis,RDA)分析浮游植物的种类组成与环境因子的关系。为使得浮游植物的细胞密度数据获得正态分布,将其进行 $\lg(x+1)$转换[14]。

2 结果与分析

2.1 贡湖环境参数特征

贡湖全年环境参数见表 1 。水温差异不显著,变化范围为(17.48±9.41)~(21.28±8.49) ℃。DO 含量的范围为(8.15±2.51)~(10.90±2.63) mg/L;pH 含量的范围为(7.88±0.29)~(8.39±0.70),均为中性偏弱碱性水体。

SS 含量各点呈极显著差异(ANOVA,$F=3.09$,$p<0.01$),变化范围为 (14.20 ± 17.38)~(192.08 ± 310.87) mg/L,最大值出现在的 2 号点。SD 呈显著差异(ANOVA,$F=2.7$,$p<0.05$),在(0.28 ± 0.16)~(0.61 ± 0.34) m 变化,同样最小值出现在 2 号点。叶绿素 a 在空间分布上呈显著差异 (ANOVA,$F=2.7$,$p<0.05$)。SS 的最大值、最小值分别出现在 2 号点、7 号点,叶绿素 a 的最大值、最小值分别出现在 2 号点、7 号点,透明度的最大值、最小值分别出现在 7 号点、2 号点。这说明了透明度主要受浮游植物和悬浮物的双重影响,并可能与该区域的水环境条件也有一定关系[15]。

高锰酸盐指数作为有机污染的指标,当其超过 4 mg/L 时,表示水体受到有机污染[16]。高锰酸盐指数范围在(5.96 ± 1.38)~(63.70 ± 135.88) mg/L,说明贡湖已经受到一定程度的有机污染。高锰酸盐指数空间分布无显著差异(ANOVA,$p<0.05$)。在时间分布上,高锰酸盐指数峰值出现在水华暴发期,水华暴发期藻类生长量远远大于死亡量,因此高锰酸盐指数在水华暴发期增高,与藻类大量生长累积有机物有关。可溶态高锰酸盐指数的增加,与藻类死亡分解有关。

贡湖氮、磷含量见表 1。方差分析结果表明 TN 的空间分布呈显著差异 (ANOVA,$F=2.44$,$p<0.05$),含量变化范围在(1.985 ± 1.353)~(15.784 ± 29.668) mg/L ,其中 NO_3^-–N 空间分布无显著差异,在(0.858 ± 0.690)~(1.138 ± 1.127) mg/L;而 NO_2^-–N 空间分布显著差异(ANOVA,$F=2$,$p<0.05$)。这与 2 号点在水华暴发期间藻类大量聚集有着密切的关系。2 号点和 3 号点与其他点位相比,硝态氮较低,氨氮呈现较高的趋势。这与太湖浮游植物更

易于吸收硝态氮来合成细胞所需要的氨基酸等物质有关[17]。TP 含量变化范围为(0.1222 ± 0.0873)~(1.1647 ± 2.3723) mg/L ,各采样点无显著差异。依据经济合作和发展组织(OECD)对水体营养类型划分标准[18],贡湖水体总体上处于富营养化状态,而水源地附近(#1、#4、#6)水环境状况相对较好。

表 1 贡湖各采样点环境参数(年平均值 ± 标准差)

Table 1 Variability of environmental parameters(mean ± sd)in Gonghu Bay

试样	WT/℃	pH	DO/(mg/L)	SD/m	SS/(mg/L)	COD_{Mn}/(mg/L)	Chla/(mg/m^3)	NO_2^--N/(mg/L)	NO_3^--N/(mg/L)	NH_4^+-N/(mg/L)	TN/(mg/L)	PO_4^{3-}/(mg/L)	TP/(mg/L)
#1	18.49± 9.90	8.39± 0.70	10.56± 2.61	0.42± 0.35	57.33± 41.77	7.30± 1.88	21.08± 17.24	0.009± 0.008	1.030± 0.946	0.280± 0.339	2.573± 1.778	0.0479± 0.0304	0.2270± 0.1227
#2	20.66± 9.58	8.21± 0.61	8.60± 4.24	0.28± 0.16	192.08± 310.87	63.70± 135.88	281.50± 548.49	0.011± 0.009	0.861± 0.853	0.331± 0.354	15.784± 29.668	0.0448± 0.0248	1.1647± 2.3723
#3	20.77± 9.35	8.35± 0.56	10.19± 3.87	0.30± 0.09	20.46± 16.01	8.35± 3.35	36.99± 27.35	0.015± 0.010	0.858± 0.690	0.341± 0.391	2.245± 1.240	0.0550± 0.0438	0.2104± 0.1514
#4	20.32± 8.56	8.39± 0.29	9.17± 1.81	0.36± 0.08	23.10± 23.84	6.05± 1.83	19.96± 17.48	0.016± 0.012	1.008± 0.811	0.220± 0.149	2.184± 1.018	0.0570± 0.0519	0.1592± 0.0412
#5	21.28± 8.49	8.21± 0.38	8.34± 1.37	0.34± 0.09	27.75± 19.76	5.96± 1.38	14.57± 8.08	0.026± 0.016	1.025± 0.752	0.295± 0.157	2.475± 1.110	0.0350± 0.0278	0.1843± 0.0652
#6	17.48± 9.41	8.35± 0.67	10.90± 2.63	0.31± 0.24	46.22± 41.76	6.72± 1.73	27.30± 17.95	0.016± 0.014	1.047± 1.005	0.158± 0.087	2.340± 1.379	0.0461± 0.0348	0.2220± 0.1279
#7	20.97± 8.78	7.88± 0.29	8.15± 2.51	0.61± 0.34	14.20± 17.38	7.17± 3.14	11.84± 9.07	0.041± 0.058	1.138± 1.127	0.255± 0.244	2.431± 1.919	0.0200± 0.0291	0.1222± 0.0873
#8	17.75± 9.64	8.38± 0.78	10.89± 2.32	0.34± 24.91	45.35± 35.32	7.01± 1.81	16.51± 9.04	0.007± 0.006	0.992± 0.936	0.148± 0.109	1.985± 1.353	0.0755± 0.1027	0.3352± 0.4166
F(df)	0.44(95)	1.13(94)	1.63(72)	2.7(92)*	3.09(95)**	1.92(87)	2.7(95)*	2(95)*	0.13(95)	1(95)	2.44(95)*	1.5(95)	1.93(95)

注:F 值为组间均方与组内均方的比值;样点的显著性差异使用单因素方差分析($p < 0.05$);"*" 表示 $p < 0.05$;"**" 表示 $p < 0.01$。

2.2 浮游植物的分布特征

贡湖全年共检出浮游植物 8 门 53 属 (表 2),其中绿藻门和硅藻门最多,分别为 20 属、15 属,其次蓝藻门 9 属,裸藻门 3 属,甲藻门和隐藻门均为 2 属,黄藻门和金藻门均鉴定出 1 属。春季采获浮游植物 8 门 39 属,夏季采获浮游植物 7 门 48 属,秋季采获浮游植物 7 门 46 属, 冬季采获浮游植物 8 门 31 属。各采样点细胞密度和主要藻类组成随季节的变化见表 3。

表 2 贡湖水源地浮游植物名录

Table 2 List of phytoplankton in the drinking water resource of Gonghu Bay

门	序号	属		春季	夏季	秋季	冬季
蓝藻门	1	铜绿微囊藻属	*Microcystis aeruginosa*	+	+	+	−
	2	水华微囊藻属	*M. flos-aquae*	−	+	+	−
	3	惠氏微囊藻属	*M. wesenbergii*	−	+	+	−
	4	其它微囊藻属	*Microcystis spp.*	+	+	+	+
	5	螺旋藻属	*Spirulina sp.*	−	+	+	−
	6	颤藻属	*Oscillatoria spp.*	−	+	+	−
	7	平裂藻属	*Merismopedia sp.*	−	+	+	−
	8	阿氏拟鱼腥藻属	*Anabaenopsis arnoldii*	+	+	+	+
	9	针状蓝纤维藻属	*Dactylococcopsis acicularis*	+	+	+	−

续表 2

门	序号	属		春季	夏季	秋季	冬季
隐藻门	10	啮蚀隐藻属	*Cryptomonas erosa*	+	+	+	–
	11	卵形隐藻属	*Cryptomonas ovata*	–	–	–	+
硅藻门	12	颗粒直链硅藻属	*Aulacoseira granulata*	–	–	–	+
	13	小环藻属	*Cyclotella spp.*	+	+	+	+
	14	针杆藻属	*Synedra sp.*	+	–	+	+
	15	脆杆藻属	*Fragilaria spp.*	+	+	+	+
	16	窗格平板藻属	*Tabellaria fenestrata*	–	+	–	–
	17	舟形藻属	*Navicula spp.*	+	+	+	+
	18	羽纹藻属	*Pinnularia sp.*	+	+	+	+
	19	布纹藻属	*Gyrosigma sp.*	+	+	+	–
	20	桥弯藻属	*Cymbella sp.*	+	+	+	+
	21	异极藻属	*Gomphonema sp.*	+	+	+	+
	22	扁圆卵形藻属	*Cocconeis placentula*	+	+	+	+
	23	短小曲壳藻属	*Achnanthes exigua*	+	+	+	–
	24	粗壮双菱藻属	*Surirella robusta*	+	+	+	+
	25	星杆藻属	*Asterionella sp.*	+	+	+	+
	26	普通等片藻属	*Diatoma vulgare*	–	+	–	–
黄藻门	27	黄丝藻属	*Heterotrichales sp.*	+	+	+	+
金藻门	28	密集锥囊藻属	*Dinobryon sertularia*	+	–	–	+
裸藻门	29	裸藻属	*Euglena spp.*	+	+	+	+
	30	扁裸藻属	*Phacus spp.*	+	+	+	+
	31	囊裸藻属	*Trachelomonas spp.*	+	+	+	+
甲藻门	32	多甲藻属	*Peridinium sp.*	+	+	+	+
	33	裸甲藻属	*Gymnodinium sp.*	–	+	–	–
绿藻门	34	斜生栅藻属	*Scenedesmus obliquus*	+	+	+	+
	35	二角盘星藻属	*Pediastrum duplex*	+	+	+	+
	36	四角十字藻属	*Crucigenia quadrata*	+	+	+	+
	37	拟新月藻属	*Closteriopsis longissima*	–	+	+	–
	38	三角四角藻属	*Tetraedron trigonum*	+	+	+	–
	39	硬弓形藻属	*Schroederia robusta*	+	+	+	+
	40	丝藻属	*Planctonema sp.*	+	+	+	+
	41	新月藻属	*Clostrium spp.*	+	+	+	+
	42	角星鼓藻属	*Staurastrum sp.*	+	+	+	–
	43	河生集星藻属	*Actinastrum fluviatile*	–	+	+	+
	44	单生卵囊藻属	*Oocystis solitaria*	+	+	+	–
	45	小球藻属	*Chlorella vulgaris*	+	+	+	+
	46	四星藻属	*Tetrastrum spp.*	–	+	+	–
	47	空球藻属	*Eudorina elegans*	–	—	+	–
	48	实球藻属	*Pandorina morum*	+	+	+	–
	49	四刺顶棘藻属	*Chodatella quadriseta*	+	+	–	–
	50	月牙藻属	*Selenastrum spp.*	+	+	+	+
	51	肥壮蹄形藻属	*Kirchneriella obesa*	+	+	+	+
	52	柯氏并联藻属	*Quadrigula chodatii*	–	–	+	–
	53	星芒衣藻属	*Chlamydomonas stellata*	+	+	+	+

注:“+”,出现;“–”,未出现。

表 3 各采样点的浮游植物变化特征

Table 3 Distribution features of phytoplanktons at different sampling sites

采样点	细胞密度/($\times10^5$ ind/L)	藻类组成的季节演变过程
#1	0.82 ~ 4119	裸-蓝藻→蓝-黄藻→蓝藻→蓝-绿藻
#2	2.04 ~ 234937	蓝藻→蓝-绿藻→蓝-硅藻→硅-蓝藻
#3	1.63 ~ 2400	蓝藻→蓝-绿藻→蓝-硅藻→蓝-黄藻
#4	0.82 ~ 344	蓝藻→蓝藻→蓝-硅藻→蓝-硅藻
#5	1.12 ~ 252	蓝藻→蓝藻→蓝-黄藻→蓝-硅藻
#6	1.63 ~ 2947	蓝-绿藻→蓝藻→蓝-硅藻→硅-蓝藻
#7	3.36 ~ 2298	蓝-绿藻→蓝-硅藻→蓝-硅藻→蓝藻
#8	3.97 ~ 456	绿-蓝藻→蓝-硅藻→蓝-硅藻→蓝藻

贡湖浮游植物分布主要表现出以下特征：

1)贡湖水华的优势藻种较为单一,以蓝藻门为优势种的水华。

2) 藻类的细胞密度是水生态系统功能和水质评价的重要参数之一[19-20]。从空间分布上来看,藻类的细胞密度最低值出现在 5 号点,细胞密度的最高值出现在 2 号点。

3)采用 Jaccard 指数分析不同样点浮游植物群落的相似性,结果表明:6 号点、8 号点、1 号点两两比较的相似性系数分别为 0.767、0.756、0.674,基本达到极相似的水平;2 号点和 3 号点比较的相似性系数为 0.761,同样也达到极相似的水平。2 号点和 7 号点比较的相似性系数为 0.469,群落结构中等不相似。

2.3 浮游植物与环境因子的相关关系

2.3.1 相关性分析 水华通常是指浮游植物的生物量显著地高于一般水体中的平均值,并在水体表面大量聚集,形成肉眼可见的藻类聚积体[21]。正是由于水华暴发的前提之一是足够的藻类生物量,因此探讨水华暴发成因的关键就是要分析浮游植物细胞密度与环境因子的相关关系。相关关系见表 4,结果表明：浮游植物细胞密度与 TN 和 TP 呈极显著相关,即较高的营养盐含量对藻类的生长起到一定的促进作用。这与 Jiang 等在巢湖的研究结果类似[22]。同时,浮游植物细胞密度与高锰酸盐指数、SS 和 Chla 呈极显著相关,与 DO 呈极显著负相关;但水温、透明度与浮游植物细胞密度相关性不显著。浮游植物的生长过程中需要吸收有机物,同时藻类死亡也会向水体贡献有机物,故与高锰酸盐指数呈极显著相关。浮游植物细胞密度与 DO 呈极显著负相关,主要表现在两方面:一是藻类生长和腐烂需要消耗一定的溶解氧,二是藻类大量漂浮聚集在水面,阻碍了覆氧。

Chla 与 TN、TP、高锰酸盐指数和 SS 呈极显著相关,与浮游植物细胞密度和环境因子的相关关系

表 4 浮游植物细胞密度与环境因子相关关系分析

Table 4 Correlation coefficients between phytoplankton density and environmental factors

	NO_2^--N	NO_3^--N	NH_4^+-N	TN	PO_4^{3-}	TP	SS	COD_{Mn}	水温	pH	DO	透明度	Chla	细胞密度
NO_2^--N	1													
NO_3^--N	0.410**	1												
NH_4^+-N	0.241*	0.147	1											
TN	−0.027	−0.039	0.057	1										
PO_4^{3-}	0.038	0.200	0.061	0.010	1									
TP	−0.102	−0.168	−0.016	0.952**	−0.026	1								
SS	−0.111	−0.115	0.017	0.912**	−0.046	0.935**	1							
COD_{Mn}	−0.093	−0.161	−0.026	0.880**	−0.009	0.933**	0.877**	1						
水温	0.099	−0.355**	0.386**	0.079	−0.127	0.119	0.113	0.080	1					
pH	−0.255*	−0.311**	0.066	−0.064	−0.066	0.059	0.004	0.066	0.399**	1				
DO	−0.251*	0.089	−0.302**	−0.294*	0.064	−0.274*	−0.225	−0.202	−0.683**	−0.098	1			
透明度	0.135	−0.023	0.126	−0.203	−0.165	−0.162	−0.242*	−0.190	0.252*	0.175	−0.199	1		
Chla	−0.085	−0.163	0.072	0.944**	−0.007	0.956**	0.905**	0.970**	0.133	0.073	−0.227	−0.203	1	
细胞密度	−0.049	−0.091	0.085	0.723**	−0.029	0.587**	0.574**	0.331**	0.109	0.154	−0.307**	−0.117	0.507**	1

注:"*"$P < 0.05$,显著相关;"**"$P < 0.01$,极显著相关。(双尾检验)

具有一致性。Wang 等[23]通过在太湖连续 5 年的监测数据指出:pH、DO 和高锰酸盐指数为富营养化的反馈因子。相关分析结果表明:pH 与 Chla 没有显著的相关性,而高锰酸盐指数和 Chla 有显著的相关性。说明藻类的快速增长导致其光合作用加强,从而使水体的 pH 值升高[24]。

2.3.2 RDA 分析 贡湖浮游植物群落与环境因子的 RDA 分析结果见图 2。前 3 个轴解释了 79.6% 浮游植物与环境因子相关性的信息。在浮游植物种属与环境因子之间的相关系数中,轴 1 中浮游植物种属与环境因子的相关性达到 0.517,轴 2 也有 0.417,说明在轴 1、轴 2 中相关性都比较高。从图 2 中可以看出,与蓝藻呈显著正相关的有 WT、TN、pH、SS、TP、COD_{Mn};与裸藻呈显著正相关的有 TN、pH、SS;与甲藻呈显著正相关的是 pH、SS、COD_{Mn}、NH_4^+-N、TP 和 Chla;蓝藻、裸藻、甲藻均与 NO_3^-、DO 呈显著负相关;与隐藻呈显著正相关的是 PO_4^{3-},绿藻、金藻、黄藻、硅藻与环境因子相关性不显著。有研究表明,蓝藻比较适应稳定的水体,而且也偏好较高的光照强度和高温,透明度的增大导致光强也比较高。蓝藻具有储磷机制,能够对磷进行富集[25],从而导致磷 的浓度随着蓝藻数量的增加而升高。裸藻和甲藻与水温呈正相关,这表明在水华暴发期间,裸藻和甲藻的细胞密度随着温度的升高而升高。

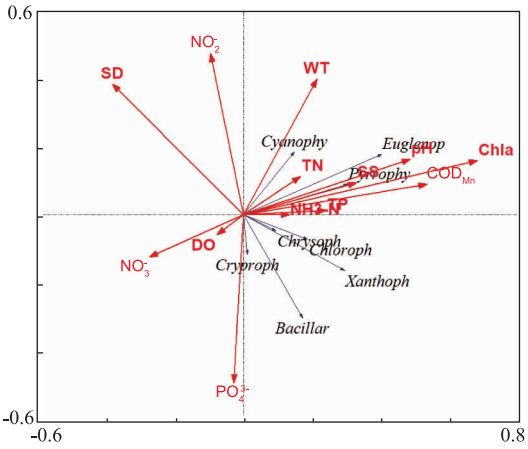


图 2 贡湖浮游植物组成与环境因子关系的 RDA 排序图

Fig. 2 Biplot of the first two axes of RDA analysis for the environmental factors associated with phytoplankton variation

2.4 水生态环境特征

依据贡湖藻类细胞密度、环境因子等 14 个监测指标进行系统聚类分析,聚类分析结果见图 3。当聚类距离取值为 3 时,可分为 4 类。第 1 类为 3 号点、4 号点和 5 号点,这 3 个点毗邻望虞河,望虞河是“引江济太”工程的重要通道,引流的长江水本身藻类密度低,大量引水也可以稀释该水域的藻类;也是重要航运路径,故其水流速度和水体紊动扩散能力导致水体交换比较频繁,水华发生的概率较低。第 2 类为 6 号点、8 号点和 1 号点,这 3 个采样点处水域开阔,水体流动交换速度快;6 号点沉水植物生长茂盛,8 号点和 1 号点次之;故水华发生的概率较低。第 3 类为 7 号点,地理位置特殊,在夏季盛行的东南风作用下,该点处于背风区,水流缓慢,滞留时间延长,水体交换能力减弱,水华发生的概率较大。第 4 类为 2 号点,该采样点地处贡湖公园附近,人流量较大,外源输入量大;且湖边有大量景观芦苇带,易在东南风作用下藻类在芦苇丛中大量聚集,发生水华的概率较大。

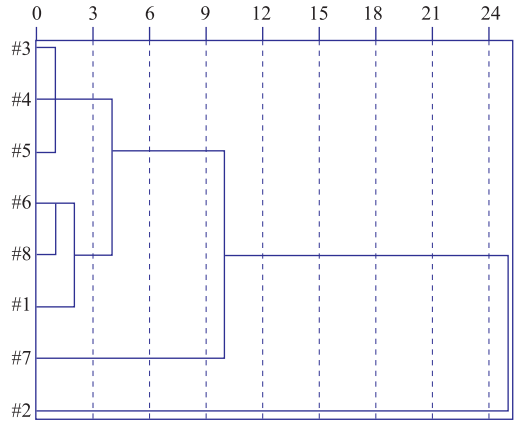


图 3 贡湖各采样点水生态环境的聚类分析结果

Fig. 3 Cluster analysis of aquatic environmental features in the Gonghu Bay

聚类分析结果表明,2 号点与 7 号点水生态环境特征差异显著;Jaccard 指数分析结果表明,这两个采样点浮游植物群落结构差异显著。6 号点、8 号点、1 号点生态环境相似,其群落结构也基本达到极相似的水平,说明浮游植物的群落结构受到了生态环境特征的影响。3 号点与 4 号点、5 号点虽然具有相似的生态环境特征,但是其群落结构与相邻的 2 号点相似性水平高于 4 号点、5 号点。这说明浮游植物的群落结构受到了水生态环境特征与地域相邻性的影响;藻类的一部分来源于采样点原位生长,另一部分来源于水力或风力驱动表层藻类的漂

移。郑炳辉[26]等在三峡库区支流大宁河也观测到类似的现象。聚类结果表明贡湖水体水生态环境特征存在显著的空间异质性,这对分析贡湖湾水华发生的主要控制因子和水环境质量分区管理具有重要意义。

3 结 语

1)贡湖全年共检出浮游植物 8 门 53 属,其中绿藻门和硅藻门最多,分别为 20 属、15 属,其次蓝藻门 9 属,裸藻门 3 属,甲藻门和隐藻门均为 2 属,黄藻门和金藻门均鉴定出 1 属。贡湖水华的优势藻种较为单一,是以蓝藻门为优势种的水华。

2)贡湖浮游植物细胞密度与 TN、TP、COD_{Mn}、SS、Chla 呈极显著相关,与 DO 呈极显著负相关。同时,营养盐、COD_{Mn}、WT、SS、pH 是影响浮游植物组成的主要因素。

3)目前,贡湖总体上处于富营养化状态,但水生态环境特征存在显著的空间特征异质性,水源地情况相对较好。贡湖水华易发期透明度、悬浮物、叶绿素 a、亚硝态氮、总氮时空分布差异显著(ANOVA ,$p < 0.05$)。浮游植物细胞密度的分布同样具有显著的空间异质性。群落结构组成受到水环境特征和空间相邻性的双重影响。

参考文献:

[1] QIN B Q. Lake eutrophication:Control countermeasures and recycling exploitation [J]. **Ecological Engineering**,2009,35(11):1569-1573.

[2] 邹华,邓继选,朱银. 植物化感作用在控制水华藻类中的应用[J]. 食品与生物技术学报,2012,31(2):134-140.
ZOU Hua,DENG Jixuan,ZHU Yin. Application of plant allelopathy in controlling of algal bloom [J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**,2012,31(2):134-140.(in Chinese)

[3] 戚莉莉,程子波,邹华,等. 高效液相色谱法测定太湖水中微囊藻毒素[J]. 食品与生物技术学报,2009,28(1):97-101.
QI Lili,CHEN Zibo,ZOU Hua,et al. HPLC determination of microcystin in Taihu Lake [J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**,2009,28(1):97-101.(in Chinese)

[4] LIU X,LU X H,CHEN Y W. The effects of temperature and nutrient ratios on Microcystis blooms in Lake Taihu,China:An 11-year investigation[J]. **Harmful Algae**,2011,10(3):337-343.

[5] 张红,黄勇,李堃. 湖面亮温对巢湖水华影响的遥感监测分析[J]. 环境科学,2012,33(10):3323-3328.
ZHANG Hong,HUANG Yong,LI Kun. Analysis of algae bloom and lake surface bright temperature in Chaohu Lake based on remote sensing data[J]. **Environmental Science**,2012,33(10):3323-3328.(in Chinese)

[6] LIU Y M,CHEN W,LI D H,et al. First report of aphantoxins in China - waterblooms of toxigenic Aphanizomenon flos-aquae in Lake Dianchi[J]. **Ecotoxicology and Environmental Safety**,2006,65(1):84-92.

[7] CHEN F Z,SONG X L,HU Y H,et al. Water quality improvement and phytoplankton response in the drinking water source in Meiliang Bay of Lake Taihu,China[J]. **Ecological Engineering**,2009,35(11):1637-1645.

[8] 沈强,俞建军,陈晖,等. 浮游生物完整性指数在浙江水源地水质评价中的应用[J]. 水生态学,2012,33(2):26-31.
SHEN Qiang,YU Jianjun,CHEN Hui,et al. Planktonic Index of Biotic Integrity(P-IBI) for water source assessment[J]. **Journal of Hydroecology**,2012,33(2):26-31.(in Chinese)

[9] 李钦钦,邓建才,胡维平,等. 太湖金墅湾水源地浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报,2010,21(7):1844-1850.
LI Qinqin,DENG Jiancai,HU Weiping,et al. Community structure of phytoplankton and its relationships with environmental factors in drinking water source of Jinshu Bay,Taihu Lake [J]. **Chinese Journal of Applied Ecology**,2010,21(7):1844-1850.(in Chinese)

[10] 陈宇炜,高锡云. 浮游植物叶绿素 a 含量测定方法的比较测定[J]. 湖泊科学,2000,12(2):185-187.
CHEN Yuwei,GAO Xiyun. Comparison of two phytoplankton chlorophyll-a concentration measurement [J]. **Journal of Lake Sciences**,2000,12(2):185-187.(in Chinese)

[11] 胡鸿钧,李尧英,魏印心,等. 中国淡水藻类[M]. 上海:上海科学技术出版社,1979.

[12] 钱迎倩,马克平. 生物多样性研究的原理与方法[M]. 北京:中国科学技术出版社,1994,141-165.
[13] 厉红梅.多变量分析在海洋环境底栖动物生态监测数据处理中的研究与应用[D]. 厦门:厦门大学,2000.
[14] JAN L,PETR S. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO[D]. London:Cambridge University,2003.
[15] 张晟,宋丹,张可,等. 三峡水库典型支流上游区和回水去营养状态分析[J]. 湖泊科学,2010,22(2):201-207.
ZHANG Sheng,SONG Dan,ZHANG Ke,et al. Trophic status analysis of the upper stream and backwater area in typical tributaries,Three Gorges Reservoir[J]. **Journal of Lake Sciences**,2010,22(2):201-207.(in Chinese)
[16] 张晟,郑坚,刘婷婷,等. 三峡水库入库支流水体中营养盐季节变化及输出[J]. 环境科学,2009,30(1):58-63.
ZHANG Sheng,ZHEN Jian,LIU Tingting,et al. Seasonal variation and output of nutrient in tributaries of Three Gorges Reservoir [J]. **Environmental Science**,2009,30(1):58-63.(in Chinese)
[17] 王震,邹华,杨桂军,等. 太湖叶绿素 a 的时空分布特征及其与环境因子的相关关系[J]. 湖泊科学,2014,26(4):567-575.
WANG Zhen,ZOU Hua,YANG Guijun,et al. Spatial-temporal characteristics of chlorophyll a and its relationship with environmental factors in Taihu Lake[J]. **Journal of Lake Sciences**,2014,26(4):567-575.(in Chinese)
[18] 秦伯强,许 海,董百丽. 富营养化湖泊治理的理论与实践[M]. 北京:高等教育出版社,2011:1-35.
[19] 况琪军,胡征宇,周广杰,等. 香溪河流域浮游植物调查与水质评价[J]. 武汉植物学研究,2004,22(6):507-513.
KUANG Qijun,HU Zhengyu,ZHOU Guangjie,et al. Investigation on phytoplankton in Xiangxi River watershed and the evaluation of its water quality[J]. **Journal of Wuhan Botanical Research**,2004,22(6):507-513.(in Chinese)
[20] 况琪军,马沛明,胡征宇,等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展[J]. 安全与环境学报,2005,5(2):87-91.
KUANG Qijun,MA Peiming,HU Zhengyu,et al. Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology[J]. **Journal of Safety and Environment**,2005,5(2):87-91.(in Chinese)
[21] 孔繁翔,高光. 大型浅水富营养湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报,2005,25(3):589-591.
KONG Fanxiang,GAO Guang. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes[J]. **Acta Ecologica Sinica**,2005,25(3):589-591.(in Chinese)
[22] JIANG Y J ,HE W ,LIU W X,et al. The seasonal and spatial variations of phytoplankton community and their correlation with environmental factors in a large eutrophic Chinese lake(Lake Chaohu)[J]. **Ecological Indicators**,2014,40:58-67.
[23] WANG X L,LU Y L,HE G Z,et al. Exploration of relationships between phytoplankton biomass and related environmental variables using multivariate statistic analysis in a eutrophic shallow lake:A 5-year study [J]. **Environmental Sciences**,2007,19 (8):920-927.
[24] Bernard P,Antoine L,Bernard L,et al. Principal component analysis:an appropriate tool for water quality evaluation and management-application to a tropical lake system[J]. **Ecological Modelling**,2004,178(3-4):295-311.
[25] REYNOLD C S. Ecology of phytoplankton[D]. Cambridge:Cambridge University Press,2006,25-53.
[26] 郑炳辉,张佳磊,王丽婧,等. 大宁河水华敏感期浮游植物与环境因子关系[J]. 环境科学,2011,32(3):641-648.
ZHENG Binghui,ZHANG Jialei,WANG Lijing,et al. Exploration of relationships between phytoplankton and related environmental factors in the Daning River during sensitive period of algal blooms [J]. **Environmental Science**,2011,32(3):641-648.(in Chinese)