

洞庭湖典型断面藻类组成及其与环境因子典范对应分析

汪 星^{1,2}, 郑丙辉^{1,2}, 刘录三^{1,2*}, 李利强³, 黄代中³, 田 琪³

(1.中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2.中国环境科学研究院国家环境保护饮用水水源地保护重点实验室, 北京 100012; 3.洞庭湖生态环境监测中心, 湖南 岳阳 414000)

摘 要:2010 年对洞庭湖 6 个典型断面进行了浮游藻类生物调查, 共鉴定出 7 门 72 属 (种), 浮游藻类的密度范围在 $67.2 \times 10^4 \sim 161.9 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$; 各典型断面间浮游藻类组成以硅藻和隐藻占优势, 藻类群落结构存在着明显的差异。藻类 Margalef 指数及 Shannon-Wiener 指数范围分别为 3.64~4.03 和 3.03~3.24, 水体水质状况良好。应用 CANOCO 4.5 软件对获得的浮游植物数据和环境因子数据进行典范相关分析(CCA), 作出物种与环境因子关系的二维排序图。结果显示, 典型断面藻类群落分布受水环境因子影响较为明显, 整体上, DO 和 TN 是影响洞庭湖典型断面藻类物种分布格局的主要因素。

关键词:洞庭湖; 藻类组成; 环境因子; 典范对应分析

中图分类号: X172 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2012)05-0995-08

Canonical Correspondence Analysis of Algae Composition and Its Environmental Factors of Typical Sections in Dongting Lake, China

WANG Xing^{1,2}, ZHENG Bing-hui^{1,2}, LIU Lu-san^{1,2*}, LI Li-qiang³, HUANG Dai-zhong³, TIAN Qi³

(1.State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2.State Environmental Protection Key Laboratory of Drink Water Resource Protection, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3.Dongting Lake Eco-Environment Monitoring Centre, Yueyang 414000, China)

Abstract: This research was performed in 2010 at 6 sections of Dongting Lake, aiming to investigate the algal species. A total of 72 kinds of algal genera (species) belonging to 7 phyla were identified. The algae had an abundance ranging from $67.2 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ to 161.9×10^4 and obviously different across the sampling sections in the three seasons, for example, Nanzui had the highest and Wanzi Lake had the lowest mean algal abundance across the 6 sampling sections. The algal community was dominated by Bacillariophyta and Cryptophyta, and significant difference was found on algal composition across 6 sampling sections. Overall, Margalef values varied from 3.64 to 4.03, while Shannon-Wiener varying from 3.03 to 3.24, both showing well water quality. Canonical correspondence analysis (CCA) was applied to explore the relationship between algal species and environmental parameters by CANOCO 4.5. The species-environment biplots were drawn based by the result of CCA. The result showed that dissolved oxygen (DO) and total nitrogen (TN) were the most important factors influencing the distribution of algal species across the 6 typical sections, for example, *Cymbella* sp., *Merismopedia* sp., *Navicula* sp., *Nitzschia* sp., and *Gyrosigma* sp. were chiefly influenced by DO, while *Melosira* sp., *Cyclotella* sp., *Cryptomonas* sp., *Euglena* sp., *Peridinium* sp., and *Stephanodiscus* sp. were chiefly influenced by TN, and *Ankistrodesmus* sp., *Scenedesmus* sp. and *Synedra* sp. were chiefly influenced by both DO and TN. Besides these, the other factors just like biochemical and chemical oxygen demand, total phosphorus (TP) and pH were also important to the algal species.

Keywords: Dongting Lake; algae composition; environmental factors; canonical correspondence analysis (CCA)

藻类处于水生态系统食物链的始端, 作为初级生产者的藻类生活周期短, 对污染物反应灵敏, 在不

同水体中具有特定的种类组成, 其群落的性质和数量会随着水化学成分而改变, 因此常被用作水质监测和评价的重要参数。我国在这方面也做了很多工作, 房英春等利用浮游藻类监测, 对苏子河进行了水质生物学评价^[1]; 况琪军等利用藻类对香溪河流域进行了水质评价^[2]; 董旭辉等利用藻类生物多样性及其对环境的指示作用对长江中下游地区湖泊富营养化

收稿日期: 2011-11-14

基金项目: 流域水环境预警技术研究与三峡库区示范 (2009ZX07528-003)

作者简介: 汪 星 (1983—), 男, 博士, 助研, 主要从事水生生物评价的研究。E-mail: wx19830411@yahoo.cn

* 通讯作者: 刘录三 E-mail: liuls@craes.org.cn

的硅藻指示属种及硅藻与总磷的转化关系进行了系统研究^[3-4]。典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA) 是一种非线性多元直接梯度分析方法,其分析结果直观,包含的信息量大,常用作藻类群落组成与水环境因子的相关关系研究^[5]。

洞庭湖位于湖南省北部,长江中游南岸,西南有湘、资、沅、澧四水入湖,北有长江的藕池、松滋、太平口流入,湖水经北部的城陵矶与长江相通,是我国五大淡水湖之一。因长年的泥沙淤积和围垦,洞庭湖被分割为东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖^[6],现有天然湖面 2 691 km²,洪道 1 307 km²。随着社会经济的发展,湖区工农业生产不断发展,居住人口逐渐增多,大量工业和生活污水直接或间接排入湖中,水质污染下洞庭湖藻类群落组成及生物多样性变化已经引起了国家有关部门的重视和人们的广泛关注。本研究设置了 6 个典型监测断面,对各断面的水体藻类组成进行了研究;并分析了藻类组成与氮、磷、溶解氧、需氧量等主要水质指标之间的相关关系,以为洞庭湖水水质评价及污染治理提供科学的数据支持。

1 材料与方法

1.1 采样断面的设置与采样方法

本研究共设置 6 个采样断面(图 1),分别为目平湖(S1)、南嘴(S2)、万子湖(S3)、虞公庙(S4)、鹿角

(S5)和东洞庭湖(S6);监测时间为 2010 年 1 月、5 月和 9 月。

藻类样品的采集使用国际标准的 25 号筛绢制成的小型浮游生物网,于水体自下向上垂直托取定量样品,用 5%的甲醛溶液固定保存。另取表层水样 2 L,摇匀,一部分原水样直接分装于 250 mL 磨口瓶,用于测定总磷、总氮、氨氮、生化需氧量等常规水质指标。

1.2 项目测试方法

水样 BOD₅、COD_{Cr}、TN、TP 以及 NH₃-N 的测定方法参照《水和废水监测分析方法》^[7]。钼酸铵分光光度法测定总磷(TP);碱性过硫酸钾-紫外分光光度法测定总氮(TN);纳氏试剂光度法测定氨氮(NH₃-N);重铬酸钾法测定化学需氧量(COD_{Cr});标准稀释法测定生化需氧量(BOD₅);pH 和溶解氧(DO)的测定采用便携式 pH 计和溶氧仪现场直接测定(水面下 0.5 m);参照《中国淡水藻志》^[8]对采集的样品进行分类、鉴定,藻细胞密度采用显微镜法^[9]。

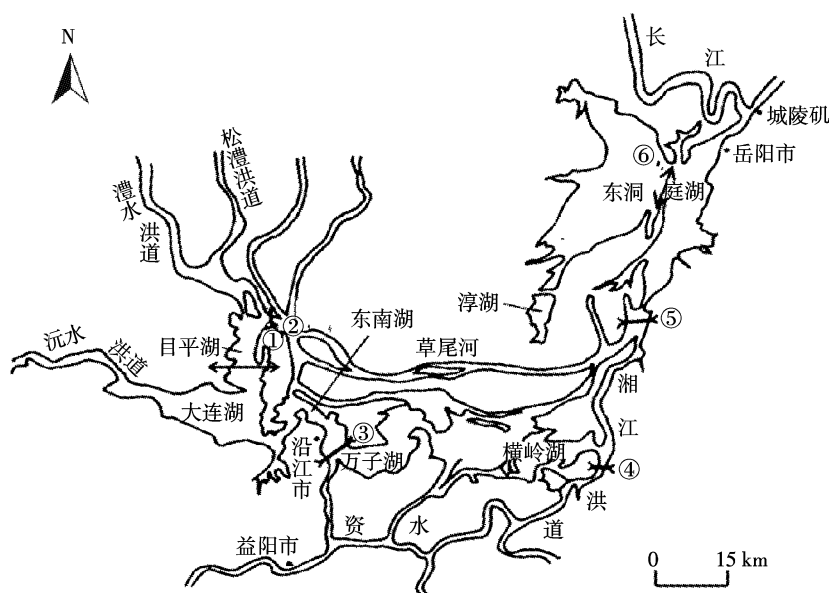
1.3 数据分析

共计算两种多样性指数和 Pielou 均匀度指数,具体计算方法如下。

Margalef 物种丰富度指数:

$$d = (S - 1) / \ln N$$

式中, d :丰富度指数; N :浮游藻类总个体数; S :浮游藻类总种类数。



①目平湖;②南嘴;③万子湖;④虞公庙;⑤鹿角;⑥东洞庭湖

1.Mupinghu; 2.Nanzui; 3.Wanzihu; 4.Yugongmiao; 5.Lujiao; 6.Dong-dongtinghu

图 1 洞庭湖典型采样断面示意图

Figure 1 Sampling sections in Dongting Lake

Shannon-Wiener 多样性指数:

$$H' = - \sum_{i=1}^S (n_i/n) \log_2 (n_i/n)$$

式中, H' : 多样性指数; n : 浮游藻类总个体数; S : 浮游藻类种类数; n_i : i 种浮游藻类个体数。

Pielou 均匀度公式:

$$J = H' / H_{\max}$$

式中: J : 均匀度; H' : 浮游藻类 Shanner-weaver 多样性指数; $H_{\max}$: 多样性指数最大值, $H_{\max} = \log_2 S$; S : 浮游藻类种类总数。

数据统计和分析均在 SPSS13.0 中完成。

采用 Canoco for Windows 4.5 软件对物种数据和环境数据进行 CCA 分析。按如下要求对藻类物种进行筛选: 该物种在各样点出现的频度 > 12.5%, 该物种在至少一个样点的相对密度 $\geq 1\%$ [10-11]。最终分析数据包含 14 个藻类分类单元和 7 个环境因子 (pH、TN、NH₃-N、TP、DO、COD_{Cr}、BOD₅)。物种矩阵经过 $\lg(x+1)$ 转换。环境因子数据除 pH 外全部进行 $\lg(x+1)$ 转换^[9]。CCA 分析结果用物种-环境因子关系的双序图表示, 图中环境因子用带有箭头的线段表示, 向量长短表示其在主轴中的作用, 线段所处象限代表环境因子与排序轴间的正负关系。分析时, 做出某一种类与环境因子连线的垂直线, 垂直线与环境因子连线相交点离箭头越近, 表示该种与该类生境因子的正相关性越大, 处于另一端的则表示与该类环境因子具有的负相关

性越大。

2 结果与分析

2.1 藻类群落结构组成与分布

2.2.1 种类组成及优势种

2010 年对洞庭湖 6 个典型断面进行了浮游藻类的调查, 鉴定的藻类共 7 门 72 属 (种), 具体见附录。其中绿藻门最多, 为 29 属, 占 40.3%; 硅藻门 25 属, 占 34.7%; 蓝藻门 9 属, 占 12.5%; 裸藻门 4 属, 占 5.6%; 金藻门 2 属, 占 2.7%; 甲藻门 2 属, 占 2.7%; 隐藻门最少, 仅有 1 属, 占 1.5%。

在时空分布上, 6 个采样断面的藻类群落结构存在着明显的差异, 如图 2 所示。硅藻门在各断面及不同季节均占据绝对优势, 属于洞庭湖监测断面的优势种群, 各断面 1 月和 5 月的硅藻比例明显高于 9 月; 其次是绿藻门、隐藻门和蓝藻门, 其中以绿藻在各个断面以及不同季节的出现频率最高, 1 月各断面所监测到的绿藻比例相对较小, 而 5 月至 9 月, 各断面的绿藻比例显著升高, 绿藻在各断面的分布比例也存在明显差异; 同样地, 各断面蓝藻比例在 1 月至 9 月也呈现逐渐递增的趋势, 并且不同季节的差异显著; 隐藻在虞公庙和鹿角两个断面的分布比例明显高于其他 4 个断面, 然而, 除鹿角 (S5) 断面外, 各断面中隐藻比例的变化趋势则与绿藻和蓝藻相反, 隐藻所占比例从 1 月至 9 月呈现逐步下降的趋势; 各断面的金藻及甲藻

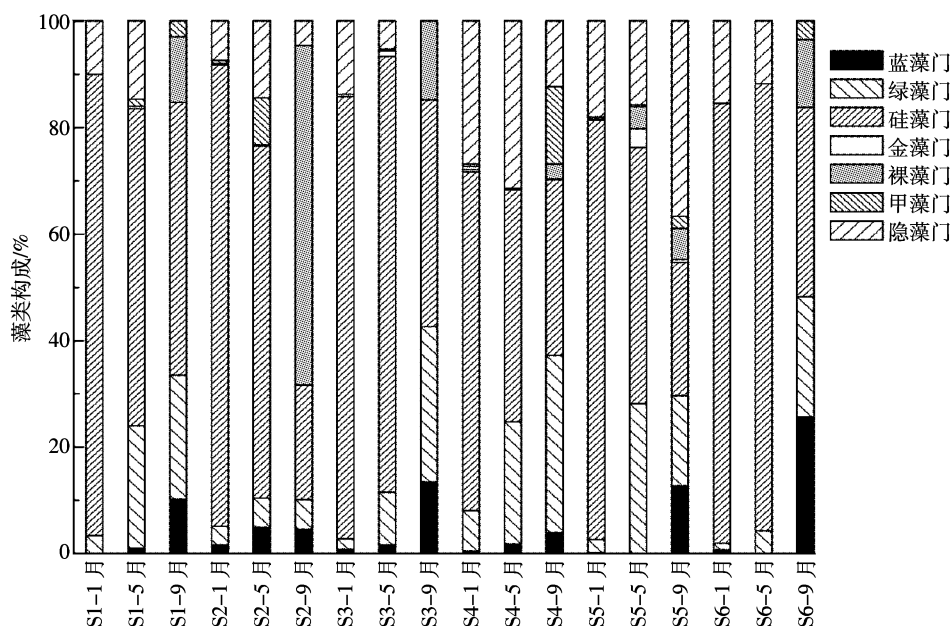


图 2 洞庭湖典型断面浮游藻类群落结构的时空分布图

Figure 2 The temporal and spatial composition of algal community in typical sections of Dongting Lake

比例明显低于其他藻类,鹿角(S5)断面金藻所占比例显著高于其他断面,其中以该断面 5 月的金藻比例尤为显著,南嘴(S2)和虞公庙(S4)两个断面甲藻所占比例明显高于其他 4 个断面,从季节变化来看,9 月甲藻所占比例显著高于 1 月和 5 月,其中以目平湖(S1)、虞公庙和东洞庭湖 3 个断面尤为显著;各断面裸藻在不同季节的比例存在显著差异,9 月裸藻所占比例显著高于 1 月和 5 月,其中以南嘴断面的差异最为显著。

调查结果显示,浮游藻类的密度变化范围为 $11.2 \times 10^4 \sim 96.9 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ 。各典型断面间的藻类密度的时空差异显著,如图 3 所示:目平湖断面的藻类密度在 1 月至 9 月呈现不断上升的趋势;南嘴和虞公庙断面的藻类密度在不同季节的差异显著,南嘴断面 5 月的藻类密度显著高于 9 月,虞公庙断面 9 月的藻类密度显著高于 1 月和 5 月;万子湖(S3)、鹿角和东洞庭湖断面在 5 月的藻类密度均高于 1 月和 9 月,但其差异不明显。总的看来,不同季节的平均密度最高值出现在南嘴,虞公庙的平均密度次之,平均密度最低值则出现在万子湖,且三者之间差异较大,其余 3 个断面的平均密度差异较小。

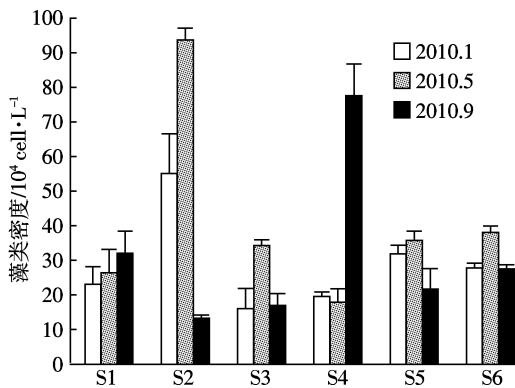


图 3 洞庭湖典型断面藻类密度的时空分布

Figure 3 The temporal and spatial distribution of algae density in typical sections of Dongting Lake

调查中发现,1 月的优势种为硅藻门的舟形藻(*Navicula* sp.),出现频度为 100%,亚优势种为硅藻门的直链藻(*Melosira* sp.)和冠盘藻(*Stephanodiscus* sp.),出现频度分别为 100%和 71.4%;5 月优势种为硅藻门的直链藻,出现频度为 100%,亚优势种为硅藻门的针杆藻(*Synedra* sp.)、隐藻门的隐藻(*Cryptomonas* sp.)以及绿藻门的栅藻(*Scenedesmus* sp.),出现频度均为 100%;9 月的优势种为裸藻门的裸藻(*Euglena* sp.),出现频度为 100%,亚优势种为硅藻门

的直链藻和布纹藻(*Gyrosigma* sp.)以及隐藻门的隐藻,出现频度分别为 100%、57.1%和 43.8%(图 4)。

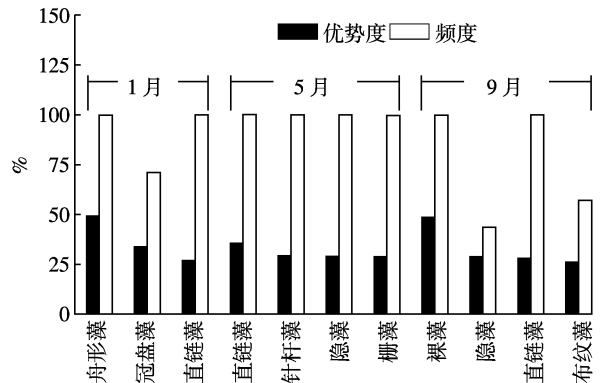


图 4 洞庭湖典型断面优势种及其出现频度

Figure 4 Dominant species and their frequencies in typical sections of Dongting Lake

2.1.2 群落物种多样性

如图 5 所示,Margalef 指数(d)范围为 3.64~4.03,万子湖与东洞庭湖(S6)断面的 Margalef 指数低于其他断面,鹿角的 Margalef 指数最高,其余断面的差别不大。Shannon-Wiener 指数(H')范围为 3.03~3.24,除万子湖断面的 Shannon-Wiener 指数明显高于其他断面,其余断面间差别不大。Pielou 指数(J)变幅为 0.53~0.58,其变化规律与 Shannon-Wiener 指数相同。

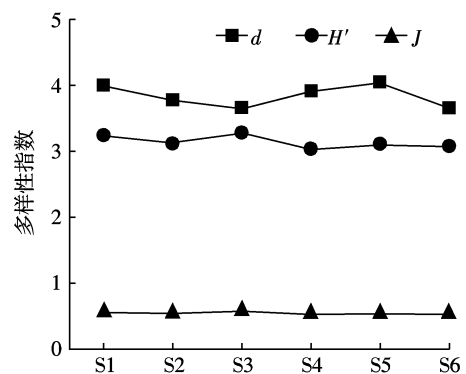


图 5 洞庭湖典型断面浮游藻类群落多样性指数

Figure 5 Diversity indices of algal community typical sections of Dongting Lake

2.2 环境因子

洞庭湖典型断面的水质状况见表 1。DO 值的变化范围为 $4.73 \sim 9.90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,DO 含量最高值出现在目平湖(S1),平均值为 $7.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最低值则出现在鹿角(S5),平均值为 $7.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;TN 在 $1.11 \sim 3.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内变化,虞公庙(S4)的平均值最高为 $2.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,

表 1 洞庭湖典型断面的水质状况

Table 1 The condition of water quality of typical sections in Dongting Lake

采样断面	化学指标	最大值	最小值	平均值	最差	最好
S1	DO/mg·L ⁻¹	9.90	5.66	7.82	Ⅲ	I
	TN/mg·L ⁻¹	2.11	1.14	1.50	>V(2.0)	IV
	TP/mg·L ⁻¹	0.09	0.06	0.07	IV	IV
	BOD ₅ /mg·L ⁻¹	3.11	1.83	2.43	Ⅲ	Ⅱ
	COD _{Cr} /mg·L ⁻¹	10.57	7.27	8.38	I	I
	NH ₃ -N/mg·L ⁻¹	0.5	0.03	0.24	Ⅱ	I
	pH 值	8.00	7.89	7.94	—	—
S2	DO/mg·L ⁻¹	9.27	5.33	7.92	Ⅲ	I
	TN/mg·L ⁻¹	1.82	1.11	1.47	V	IV
	TP/mg·L ⁻¹	0.12	0.06	0.09	V	IV
	BOD ₅ /mg·L ⁻¹	3.07	1.45	2.39	Ⅲ	I
	COD _{Cr} /mg·L ⁻¹	11.6	7.68	9.29	I	I
	NH ₃ -N/mg·L ⁻¹	0.76	0.12	0.38	Ⅲ	I
	pH 值	8.18	7.84	7.95	—	—
S3	DO/mg·L ⁻¹	9.72	5.59	7.87	Ⅲ	I
	TN/mg·L ⁻¹	1.79	1.23	1.44	V	IV
	TP/mg·L ⁻¹	0.08	0.06	0.07	IV	IV
	BOD ₅ /mg·L ⁻¹	2.54	1.38	1.83	I	I
	COD _{Cr} /mg·L ⁻¹	10.0	6.33	8.00	I	I
	NH ₃ -N/mg·L ⁻¹	0.25	0.15	0.21	I	I
	pH 值	8.30	7.48	7.90	—	—
S4	DO/mg·L ⁻¹	8.91	4.87	7.25	IV	I
	TN/mg·L ⁻¹	3.17	1.83	2.34	>V(2.0)	V
	TP/mg·L ⁻¹	0.10	0.05	0.08	IV	Ⅲ
	BOD ₅ /mg·L ⁻¹	3.34	1.72	2.35	Ⅲ	I
	COD _{Cr} /mg·L ⁻¹	11.70	6.27	9.68	I	I
	NH ₃ -N/mg·L ⁻¹	0.62	0.13	0.30	Ⅲ	I
	pH 值	7.97	7.43	7.74	—	—
S5	DO/mg·L ⁻¹	7.88	4.73	6.24	IV	I
	TN/mg·L ⁻¹	3.07	1.40	2.13	>V(2.0)	IV
	TP/mg·L ⁻¹	0.12	0.07	0.09	V	IV
	BOD ₅ /mg·L ⁻¹	4.43	2.92	3.47	IV	I
	COD _{Cr} /mg·L ⁻¹	13.03	8.37	11.01	I	I
	NH ₃ -N/mg·L ⁻¹	0.77	0.12	0.34	Ⅲ	I
	pH 值	8.13	7.68	7.97	—	—
S6	DO/mg·L ⁻¹	9.33	5.53	7.33	Ⅲ	I
	TN/mg·L ⁻¹	2.80	1.60	2.04	>V(2.0)	V
	TP/mg·L ⁻¹	0.12	0.07	0.09	V	IV
	BOD ₅ /mg·L ⁻¹	4.40	0.64	2.23	IV	I
	COD _{Cr} /mg·L ⁻¹	8.53	6.80	7.53	I	I
	NH ₃ -N/mg·L ⁻¹	0.39	0.11	0.21	Ⅱ	I
	pH 值	8.32	7.88	8.08	—	—

万子湖(S3)的平均值最低为 1.44 mg·L⁻¹。TP 的平均值相差较小,最大平均值出现在南嘴(S2)、鹿角(S5)和东洞庭湖(S6)为 0.09 mg·L⁻¹,目平湖(S1)与万子湖(S3)都达到了最小平均值为 0.07 mg·L⁻¹;BOD₅受季

节的变化影响较大,全年在 0.64~4.43 mg·L⁻¹ 范围内变化,平均值最高出现在鹿角为 3.47 mg·L⁻¹,万子湖断面的平均值为 1.83 mg·L⁻¹;COD_{Cr} 的变化范围为 6.27~13.03 mg·L⁻¹,鹿角的平均值达到最高为 11.01 mg·L⁻¹,而最小平均值则出现在东洞庭湖为 7.53 mg·L⁻¹;NH₃-N 的季节波动性较大,浓度值在 0.03~0.77 mg·L⁻¹ 间变化,南嘴的平均值最大为 0.38 mg·L⁻¹,而万子湖与东洞庭湖的平均值均达到最小为 0.21 mg·L⁻¹;pH 值为中性稍偏碱性,所有断面的平均值为 7.93。

总的看来,洞庭湖典型断面的水质状况良好,但值得注意的是,水体中总氮及总磷的浓度较高,均达到Ⅳ类、Ⅴ类甚至更差的水质标准,这可能成为导致水体富营养化和浮游藻类大幅度生长的诱因。

2.3 藻类群落与环境因子关系的 CCA 分析

根据藻类出现的频度和相对密度,选取了 14 种藻类用于 CCA 分析,藻类代码及其在各采样断面的出现频度见表 2。图 6 反映了藻类组成与 7 种环境因子间的关系。环境因子第一、二轴间的相关系数为 0,表明分析结果可信^[12]。第一轴排序与溶解氧(DO)负相关(-0.311),与其他环境因子正相关。第二轴排序与 COD_{Cr}(0.462)、BOD₅(0.204)、NH₃-N(0.535)、TN(0.607)和 TP(0.206)正相关,而与 pH(-0.603)和 DO(-0.152)负相关。同时,藻类属种与环境因子的 CCA 分析结果较好地反映了藻类与环境特征的相关性。

结果显示,14 种藻类大致可分为 4 组。种组 I 包含桥弯藻、平裂藻、舟形藻、菱形藻和布纹藻 5 种;平裂藻与舟形藻与 DO 呈强烈的正相关,与其他环境因子呈现一定的负相关;桥弯藻、菱形藻和布纹藻不仅与 DO 有强的正相关,还与 pH 正相关。种组 II 包含与 TN 正相关的纤维藻、栅藻、针杆藻、直链藻、小环藻、隐藻和裸藻,其中纤维藻、栅藻和针杆藻还与 DO 呈现高度正相关。种组 III 只有多甲藻一种,该藻类与 TN 呈强烈的正相关,并与 COD_{Cr} 有强的负相关,可见 TN 与 COD_{Cr} 是洞庭湖多甲藻生长的限制条件。种组 IV 只包含冠盘藻 1 个种类,其与 COD_{Cr}、NH₃-N、TN、TP 及 pH 均有强的正相关。总的看来,DO 及 TN 浓度是影响洞庭湖典型断面藻类种群分布格局的主要因素,其中,DO 主要影响桥弯藻、平裂藻、舟形藻、菱形藻、布纹藻、纤维藻、栅藻和针杆藻,TN 主要影响纤维藻、栅藻、针杆藻、直链藻、小环藻、隐藻、裸藻、多甲藻和冠盘藻,其他环境因子对典型断面的藻类种群分布影响也较为明显。

3 讨论

中营养型湖泊中常以甲藻、隐藻、硅藻类占优势,富营养型湖泊则常以绿藻、蓝藻类占优势^[13]。从洞庭湖浮游藻类优势种和亚优势种来看,各典型断面浮游藻类组成以硅藻门的直链藻、冠盘藻、针杆藻和布纹藻,隐藻门的隐藻等占优势,说明洞庭湖水体基本处于中营养状态。2000 年戴友芝等^[10]利用底栖动物对洞庭湖整体水质进行了评价,结果显示洞庭湖整体水质良好,属于轻污染状态。这表明,近些年来随着社会经济的发展,洞庭湖水质整体上无明显变化,但值得注意的是,在 5 月的调查中,绿藻门的栅藻成为了亚优势种,可见洞庭湖水质有下降的趋势,需有关部门引起重视。

群落物种多样性是群落组织独特的生物学特征,它反映了群落特有的物种组成和个体密度特征。各典型断面的 Margalef 指数和 Shannon-Wiener 指数均大于 3,表明各断面水体属于清洁状态^[14-16],这与前面讨论中提到的中营养状态(轻度污染)有一定偏差,可能是由于 Margalef 指数和 Shannon-Wiener 指数仅考虑到藻类的群落多样性,而忽略了不同藻类对水体污染的耐受力不同。万子湖断面远离洪道,并且受城镇生活污染及农村面源污染较小,水质较其他断面要好,浮游植物种类组成和密度较小,使得其 Shannon-Wiener 指数偏高,而 Margalef 指数偏低。

典范对应分析(CCA)能够客观反映群落与环境因子的相互关系,近些年来被广泛应用于湖泊等水体

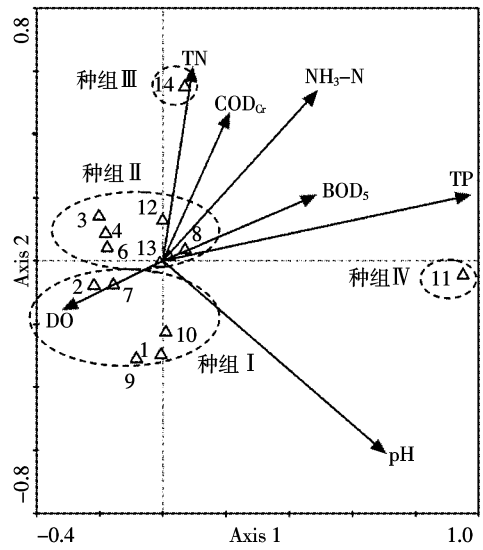


图 6 洞庭湖典型断面藻类与环境因子的 CCA 排序图
Figure 6 CCA biplot of algal species and environment factors of typical sections in Dongting Lake

藻类群落与水环境因子复杂关系的研究。杨丽标等^[17]通过 CCA 分析发现,TP 是影响巢湖藻类物种分布格局的重要因素。李亚蒙^[18]、沈会涛^[19]等对白洋淀藻类群落与环境因子的 CCA 分析结果表明,pH 值和 TP 是影响该区域浮游藻类分布的重要因素。洞庭湖作为我国五大湖泊之一,其水环境状况越来越受国家关注,然而有关洞庭湖藻类与环境因子关系的 CCA 分析罕见。本研究中 CCA 分析结果显示,水体 DO 和 TN 浓度是影响洞庭湖 6 个典型断面藻类分布的主要因素。有研究表明,DO 与藻类生长呈显著正相关^[20]。因此,

表 2 CCA 分析中浮游植物的种类代码及其在各采样断面的频度分布(%)
Table 2 Codes and frequency distribution of algal species in sampling sections for CCA(%)

代码	种类	目平湖	南嘴	万子湖	虞公庙	鹿角	东洞庭湖
1	桥弯藻(<i>Cymbella</i> sp.)	100	100	100	66.7	100	100
2	平裂藻(<i>Merismopedia</i> sp.)	66.7	66.7	66.7	33.3	33.3	33.3
3	纤维藻(<i>Ankistrodesmus</i> sp.)	33.3	66.7	100	100	100	66.7
4	栅藻(<i>Scenedesmus</i> sp.)	100	100	100	100	100	100
5	针杆藻(<i>Synedra</i> sp.)	100	100	100	100	100	100
6	直链藻(<i>Melosira</i> sp.)	100	100	100	100	100	100
7	舟形藻(<i>Navicula</i> sp.)	100	100	100	100	100	100
8	小环藻(<i>Cyclotella</i> sp.)	100	100	100	66.7	100	66.7
9	菱形藻(<i>Nitzschia</i> sp.)	100	100	100	100	100	100
10	布纹藻(<i>Gyrosigma</i> sp.)	100	100	100	66.7	66.7	66.7
11	冠盘藻(<i>Stephanodiscus</i> sp.)	100	100	33.3	33.3	66.7	100
12	隐藻(<i>Cryptomonas</i> sp.)	66.7	100	66.7	100	100	66.7
13	裸藻(<i>Euglena</i> sp.)	66.7	66.7	66.7	66.7	100	33.3
14	多甲藻(<i>Peridinium</i> sp.)	66.7	66.7	33.3	66.7	100	33.3

我们认为文中藻类种群分布与水体 DO 的相关性可能是由于不同水环境条件下藻类种群的生长繁殖变化导致水体 DO 浓度变化所致。文中应用CCA 分析方法对大量数据进行直接梯度排序,不仅揭示出洞庭湖典型断面浮游藻类对环境因子的响应,在一定程度上还反映出湖泊水体的水质状况,为该地区的浮游藻类生态学研究提供了一种新的工具;另外,除主要的环境因子外,人为干扰(农业灌溉,生活污水排放等)、长江流域的水文影响等在很大程度上也影响着湖泊内浮游藻类的群落结构。

4 结论

(1)2010 年在洞庭湖 6 个典型断面共观察到浮游藻类 7 门 72 属(种),其中以绿藻门为主,共 29 属,占总数的 40.3%。各典型断面间浮游藻类组成以硅藻和隐藻占优势,并且藻类群落结构存在着明显的差异。

(2)调查期间,浮游藻类的密度范围在 $67.2 \times 10^4 \sim 161.9 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$, Margalef 指数及 Shannon-Wiener 指数范围分别为 3.64~4.03 和 3.03~3.24,表明水体水质状况良好,属中营养状态。

(3)CCA 分析结果显示,典型断面藻类群落分布受水环境因子影响较为明显。整体上,DO 和 TN 是影响洞庭湖典型断面藻类物种分布格局的主要因素。

参考文献:

- [1] 房英春,田 春,肖友红. 苏子河浮游藻类多样性与水质的生物评价[J]. 水利渔业, 2007, 27(1): 57-58.
FANG Ying-chun, TIAN Chun, XIAO You-hong. Diversity of planktonic algae and biological assessment of water quality in the Suzi River[J]. *Reservoir Fisheries*, 2007, 27(1): 57-58.
- [2] 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 Qi-jun, HU Zheng-yu, ZHOU Guang-jie, 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.
- [3] 董旭辉,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.
DONG Xu-hui, YANG Xiang-dong, WANG Rong, et al. A diatom-total phosphorus transfer function for lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. *J Lake Sci*, 2006, 18(1): 1-12.
- [4] 董旭辉,羊向东,王 荣. 长江中下游地区湖泊富营养化的硅藻指示性属种[J]. 中国环境科学, 2006, 26(5): 570-574.
DONG Xu-hui, YANG Xiang-dong, WANG Rong. Diatom indicative species of eutrophication of the lakes in the middle and lower reach regions of Yangtze River [J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(5):

570-574.

- [5] Ter Braak C J F, Prentice I C. A theory of gradient analysis[J]. *Advances in Ecological Research*, 1986, 18: 271-317.
- [6] 戴友芝,唐受印,张建波. 洞庭湖底栖动物种类分布及水质生物学评价[J]. 生态学报, 2000, 20(2): 277-282.
DAI You-zhi, TANG Shou-yin, ZHANG Jian-bo. The distribution of zoobenthos species and bio-assessment of water quality in Dongting Lake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(2): 277-282.
- [7] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京: 中国环境出版社, 2002.
Chinese EPA. Methods for the monitoring and analysis of water and wastewater[M]. The 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [8] 齐雨藻,李家英. 中国淡水藻志[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
QI Yu-zao, LI Jia-ying. China limnetic algal flora[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [9] 徐金森,郑天凌,郭清华,等. 两种海洋细菌对赤潮藻的细胞生物量的影响研究[J]. 海洋科学, 2002, 26(12): 57-60, 67.
XU Jin-sen, ZHENG Tian-ling, GUO Qing-hua, et al. Influence on the cell biomass of red tide alga alexandrium tamarense(lebour) balech cultured with two marine bacteria[J]. *Marine Sciences*, 2002, 26(12): 57-60, 67.
- [10] Lopes M R M, Bicudo C E M, Ferragut M C. Short term spatial and temporal variation of phytoplankton in a shallow tropical oligotrophic reservoir, southeast Brazil[J]. *Hydrobiologia*, 2005, 542: 235-247.
- [11] Muylaert K, Sabbe K, Vyverman W. Spatial and temporal dynamics of phytoplankton communities in a freshwater tidal estuary (Schelde, Belgium)[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, 50: 673-687.
- [12] Ter Braak C J F. Canonical correspondence analysis: A new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis[J]. *Ecology*, 1986, 67(5): 1167-1179.
- [13] 庞清江,李白英. 东平湖水体富营养化评价[J]. 水资源保护, 2003, 19(5): 42-44.
PANG Qing-jiang, LI Bai-ying. Assessment of eutrophication of Dongping Lake water body[J]. *Water Resources Protection*, 2003, 19(5): 42-44.
- [14] Douerelo I, Perona E, M ateo P. Use of cyanobacteria to assess water quality in running waters[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 127: 377-384.
- [15] 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 Qi-jun, MA Pei-ming, HU Zheng-yu, 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.
- [16] 许木启. 从浮游动物群落结构与功能的变化看府河-白洋淀水体的自净效果[J]. 水生生物学报, 1996, 20(3): 212-219.
XU Mu-qi. Evaluation of self-purification efficiency of Fuhe River stream-Baiyangdian Lake through zooplankton[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1996, 20(3): 212-219.
- [17] 杨丽标,韩小勇,孙 璞,等. 巢湖藻类组成与环境因子典范对应分析[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(5): 952-958.
YANG Li-biao, HAN Xiao-yong, SUN Pu, et al. Canonical correspondence analysis of algae community and its environmental factors in the

- Lake Chaohu, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(5):952-958.
- [18] 李亚蒙, 赵 琦, 冯广平, 等. 白洋淀硅藻分布及其与水环境的关系[J]. *生态学报*, 2010, 31(17):4559-4570.
- LI Ya-meng, ZHAO Qi, FENG Guang-ping, et al. The diatom assemblages and their response to different environments of Baiyangdian Lake, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 31(17):4559-4570.
- [19] 沈会涛, 刘存歧. 白洋淀浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析[J]. *湖泊科学*, 2008, 20(1):773-779.
- SHEN Hui-tao, LIU Cun-qi. Canonical correspondence analysis of phytoplankton community and its environmental factors in the Lake Baiyangdian[J]. *J Lake Sci*, 2008, 20(1):773-779.
- [20] 游 亮, 崔莉凤, 刘载文, 等. 藻类生长过程中 DO、pH 与叶绿素相关性分析[J]. *环境科学与技术*, 2007, 30(9):42-45.
- YOU Liang, CUI Li-feng, LIU Zai-wen, et al. Correlation analysis of parameters in algal growth [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, 30(9):42-45.

附录:

附表 洞庭湖采样断面浮游藻类的种类组成
Table Composition of algal species in sampling sections of Dongting Lake

编 号	种 类(属)	编 号	种 类(属)
1	绿藻门 Chlorophyta	37	硅藻门 Bacillariophyta
2	栅 藻 <i>Scenedesmus</i> sp.	38	肋缝藻 <i>Frustulia</i> sp.
3	韦斯藻 <i>Westella</i> sp.	39	卵形藻 <i>Cocconeis</i> sp.
4	衣 藻 <i>Chlamydomonas</i> sp.	40	异极藻 <i>Gomphonema</i> sp.
5	纤维藻 <i>Ankistrodesmus</i> sp.	41	脆杆藻 <i>Fragilaria</i> sp.
6	弓形藻 <i>Schroederia</i> sp.	42	桥弯藻 <i>Cymbella</i> sp.
7	网球藻 <i>Dictyosphaerium</i> sp.	43	双眉藻 <i>Amphora</i> sp.
8	丝 藻 <i>Ulothrix</i> sp.	44	曲壳藻 <i>Achnanthes</i> sp.
9	盘星藻 <i>Pediastrum</i> sp.	45	布纹藻 <i>Gyrosigma</i> sp.
10	十字藻 <i>Crucigenia</i> sp.	46	冠盘藻 <i>Stephanodiscus</i> sp.
11	新月藻 <i>Closterium</i> sp.	47	羽纹藻 <i>Pinnularia</i> sp.
12	集星藻 <i>Actinastrum</i> sp.	48	等片藻 <i>Diatoma</i> sp.
13	四星藻 <i>Tetrastrum</i> sp.	49	短缝藻 <i>Eunotia</i> sp.
14	四角藻 <i>Tetraedron</i> sp.	50	星杆藻 <i>Asterionella</i> sp.
15	小球藻 <i>Chlorella</i> sp.	51	美壁藻 <i>Caloneis</i> sp.
16	多芒藻 <i>Golenkinia</i> sp.	52	波缘藻 <i>Cymatopleura</i> sp.
17	空星藻 <i>Coelastrum</i> sp.	53	菱板藻 <i>Hantzschia</i> sp.
18	鼓 藻 <i>Cosmarium</i> sp.	54	平板藻 <i>Tabellaria</i> sp.
19	角星鼓藻 <i>Staurastrum</i> sp.	55	扎卡四棘藻 <i>Attheya zachariasii</i>
20	拟新月藻 <i>Closteriopsis</i> sp.	56	蓝藻门 Cyanophyta
21	实球藻 <i>Pandorina</i> sp.	57	蓝纤维藻 <i>Dactylococcopsis</i> sp.
22	空球藻 <i>Eudorina</i> sp.	58	颤 藻 <i>Oscillatoria</i> sp.
23	绿梭藻 <i>Chlorogonium</i> sp.	59	平裂藻 <i>Merismopedia</i> sp.
24	小桩藻 <i>Characium</i> sp.	60	鱼腥藻 <i>Anabaena</i> sp.
25	球囊藻 <i>Sphaerocystis</i> sp.	61	尖头藻 <i>Raphidiopsis</i> sp.
26	翼膜藻 <i>Pteromonas</i> sp.	62	隐球藻 <i>Aphanocapsa</i> sp.
27	微芒藻 <i>Micractinium</i> sp.	63	鞘丝藻 <i>Lyngbya</i> sp.
28	浮球藻 <i>Planktosphaeria</i> sp.	64	微囊藻 <i>Microcystis</i> sp.
29	球粒藻 <i>Coccomonas</i> sp.	65	席藻 <i>Phormidium</i> sp.
30	卵囊藻 <i>Oocystis</i> sp.	66	裸藻门 Euglenophyta
31	针杆藻 <i>Synedra</i> sp.	67	裸 藻 <i>Euglena</i> sp.
32	菱形藻 <i>Nitzschia</i> sp.	68	扁裸藻 <i>Phacus</i> sp.
33	舟形藻 <i>Navicula</i> sp.	69	陀螺藻 <i>Strombomonas</i> sp.
34	双菱藻 <i>Surirella</i> sp.	70	囊裸藻 <i>Trachelomonas</i> sp.
35	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	71	金藻门 Chrysophyta
36	辐节藻 <i>Stauroneis</i> sp.	72	锥囊藻 <i>Dinobryon</i> sp.
	直链藻 <i>Melosira</i> sp.		鱼鳞藻 <i>Mallomonas</i> sp.
			甲藻门 Pyrrophyta
			多甲藻 <i>Peridinium</i> sp.
			角甲藻 <i>Ceratium</i> sp.
			隐藻门 Cryptophyta
			隐 藻 <i>Cryptomonas</i> sp.