

文章编号: 1674 - 5566(2015)05 - 0702 - 10

## 阳澄湖浮游植物群落结构特征及其与水环境因子的关系

丁娜<sup>1</sup>, 周彦锋<sup>1,2</sup>, 宋江腾<sup>1</sup>, 蒋书伦<sup>1</sup>, 葛优<sup>1</sup>, 金贝<sup>1</sup>, 尤洋<sup>1,2</sup>

(1. 南京农业大学 无锡渔业学院, 江苏 无锡 214081; 2. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心 农业部长江下游渔业资源环境科学观测实验站, 江苏 无锡 214081)

**摘要:**2014 年 7 - 11 月对阳澄西湖浮游植物群落结构及其时空分布进行了调查, 运用 Pearson 相关性分析、冗余分析(RDA)与水环境因子的相关性进行了分析。调查期间共发现浮游植物 8 门 68 属 142 种, 其中绿藻门 63 种, 占 44.37%, 硅藻门 27 种, 蓝藻门 22 种。优势种中绿藻门种数最多, 其中 61.11% 的优势种为富营养型水体指示藻类。细胞密度年均  $(3.99 \pm 4.00) \times 10^6$  cell/L, 生物量年均  $(1.41 \pm 1.05)$  mg/L, 夏季均高于秋季; 夏秋季藻类密度以蓝藻门最高, 生物量则以硅藻门最高。多样性指数结果表明, 阳澄西湖水质总体显示为中污染, 其中秋季水质状况优于夏季。Pearson 相关性分析表明, 阳澄西湖夏季浮游植物现存量主要与 pH、水温、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$  呈正相关, 秋季则主要与  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、DTN 和 DTP 有关。RDA 分析显示, 夏季浮游植物水平分布的主要影响因素是 T、TN 和 DTP, 而 pH、T、DO 和 DTN 为秋季藻类分布的主要影响因素。

**研究亮点:** 分别设定 7、8、9 月和 10、11 月作为夏、秋两个季度的代表, 对阳澄西湖 12 个样点进行监测。结合 Pearson 相关性分析、冗余分析(RDA)、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielous 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数对浮游植物群落结构与水环境因子的相关性进行研究, 得出浮游植物分布的主要影响因素。

**关键词:** 浮游植物; 群落结构; 环境因子; 冗余分析; 季节变化

**中图分类号:** Q178

**文献标志码:** A

浮游植物是水生态系统中生物量和生产力的重要贡献者, 也是水体中能量流动和物质循环的重要环节<sup>[1]</sup>。浮游植物与水环境因子密切相关<sup>[2-3]</sup>, 在多种环境因子的综合作用下, 浮游植物的种类组成、细胞丰度和生物量会呈现一定的动态变化<sup>[4-5]</sup>, 而这种动态变化也能直接影响该水域水体理化性质<sup>[6]</sup> 和其他水生生物的新陈代谢<sup>[7]</sup>。近年来, 浮游植物作为监测和评价某一水域水体污染状况的重要依据受到广泛关注<sup>[8-9]</sup>, 但关于阳澄西湖浮游植物与环境因子关系的研究报道较少<sup>[10-11]</sup>。

阳澄湖位于江苏省苏州市东北部, 是太湖平原上的第三大淡水湖。该湖区南北长 17 km, 东西宽 11 km, 面积达 119 km<sup>2</sup>, 被两狭长半岛分为东湖(占 44.08%)、中湖(占 29.03%)和西湖(占

26.89%) 3 部分, 本次调查以西湖为研究对象。2008 年阳澄西湖蓝藻大规模爆发, 为保障居民饮用水安全, 苏州市政府出台相关政策将该湖区围网全部拆除, 同时开展增殖放流以帮助湖体实现生态修复<sup>[10,12]</sup>。为了阐明鲢鳙放流后对阳澄西湖水质状况及其生态环境的影响, 本文系统地调查了该湖区浮游植物群落结构特征的时空变化, 并应用 Pearson 相关性分析及冗余分析(RDA)探讨了藻类群落结构与水环境因子间的关系, 为阳澄西湖生态修复的后续研究奠定基础。

### 1 材料与方法

#### 1.1 采样点设置

依据阳澄西湖的地理形态和水文条件, 对阳澄西湖 4 个断面进行了调查, 并结合样点设置规

收稿日期: 2015-01-14 修回日期: 2015-06-10

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201303056-02)

作者简介: 丁娜(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为渔业资源。E-mail: dingn221@163.com

通信作者: 尤洋, E-mail: youy@ffrc.cn

范<sup>[13]</sup>,选取 12 个采样点(31°23′26.8″~31°28′55.1″N,120°42′13.3″~120°45′32.8″E),编号采样点分别设置为断面 I (S1、S2、S3)、断面 II (S4、S5、S6)、断面 III (S7、S8、S9)和断面 IV (S10、S11、S12),见图 1。其中 S4、S7 和 S10 为出水口,S6、S9 和 S12 为进水口。采样工作于 2014 年 7-11 月每月月初进行,根据当地气象特征,将 7-9 月划定为夏季,10-11 月划定为秋季。

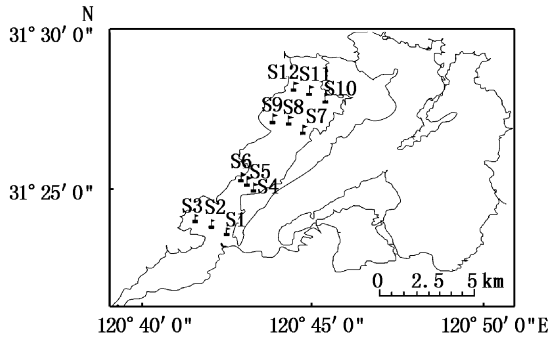


图 1 采样点示意图

Fig. 1 Sketch map of sampling points

## 1.2 样品采集与处理

利用有机玻璃采水器采集 1 L 表层水样加 10 mL 鲁哥氏液(Lugol's solution)固定,用于浮游植物定量分析。用 25 号浮游生物网在水体 0.3~0.5 m 处呈“∞”形来回拖动 5 min,收集浮游生物网中样品并浓缩至 100 mL,加入 3 mL 鲁哥氏液现场固定,用于浮游植物定性分析<sup>[14-15]</sup>。藻类计数使用 10×40 倍镜、0.1 mL 计数框进行,每个样本重复计数 2 次取平均值,每次观察 300 个视野。同时采集同期水样带回实验室进行水环境因子的监测,主要参考《水和废水监测分析方法》<sup>[16]</sup>。

## 1.3 鲢鳙放养密度和规格

鲢鳙增殖放流工作于 2009 年开始展开,其中 2009 年具体放流规格不详,鲢鳙放流比例为 1.18:1,2014 年为 1.13:1。具体放流密度和规格见表 1。

表 1 鲢鳙放流密度和规格

Tab. 1 Density and size of silver and bighead carps

时间 time	鲢 silver carp			鳙 bighead carp		
	规格/g specification	密度/(g/m <sup>3</sup> ) abundance		规格/g specification	密度/(g/m <sup>3</sup> ) abundance	
2009 年 <sup>[12]</sup>	-	6.43		-	5.44	
2014 年	14	3.06		4	2.70	

## 1.4 数据处理

根据优势度指数( $Y$ )<sup>[17]</sup>、Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )<sup>[18]</sup>、Pielous 均匀度指数( $J$ )<sup>[19]</sup>、Margalef 丰富度指数( $D$ )<sup>[20]</sup>和 Jaccard 种类相似性指数( $P$ )<sup>[21]</sup>对阳澄西湖浮游植物群落结构特征进行分析评价。其计算公式如下:

$$Y = (N_i/N) \times f_i \quad (1)$$

$$H' = -\sum (N_i/N) \log_2(N_i/N) \quad (2)$$

$$J = H'/\ln S \quad (3)$$

$$D = (S-1)/\log_2 N \quad (4)$$

$$P = c/(a+b-c) \quad (5)$$

式中: $N_i$ 为第*i*种的个体数; $N$ 为所有种类的总个体数; $f_i$ 为各采样点第*i*种的出现频率; $a$ 、 $b$ 分别为不同季节调查到的浮游植物种类数; $c$ 为两个季节中均调查到的浮游植物种类数。

## 1.5 统计分析

数据采用 SPSS 19.0 软件进行藻类密度、生物量与水环境因子的 Pearson 相关性分析,利用 Canoco 4.5 软件对浮游植物细胞密度和水环境因

子的相关关系进行冗余分析(RDA),按照该物种在各样点出现的频度 > 12.5%,至少在一个站位的相对密度 ≥ 1% 的条件进行物种筛选<sup>[22]</sup>,为满足分析数据呈正态分布,浮游植物细胞密度及水环境数据(除 pH)均进行  $\lg(x+1)$  处理<sup>[23]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 浮游植物种类组成

本次调查共鉴定出浮游植物 8 门 68 属 142 种(包括变种和变型)。其中绿藻门 31 属 63 种,占全年浮游植物总种属的 44.37%,硅藻门 10 属 27 种,蓝藻门 11 属 22 种,裸藻门 5 属 16 种,金藻门 4 属 5 种,甲藻门 3 属 4 种,隐藻门 2 属 3 种,黄藻门 2 属 2 种。

浮游植物种类数存在一定季节差异(表 2),夏季共鉴定出浮游植物 8 门 62 属 116 种,其中绿藻门 31 属 61 种,硅藻门 6 属 15 种,裸藻门 5 属 14 种。秋季共鉴定出浮游植物 8 门 53 属 82 种,其中绿藻门 22 属 37 种,硅藻门 6 属 12 种,裸藻

门 4 属 7 种。根据 Jaccard 种类相似性指数结果 0.62, 为中度相似。显示, 夏秋季浮游植物的种类相似性指数为

表 2 阳澄湖浮游植物种类组成季节变化

**Tab.2 Seasonal changes of phytoplankton composition in Yangcheng Lake** %

时间 time	绿藻门 Chlorophyta	蓝藻门 Cyanophyta	硅藻门 Bacillariophyta	裸藻门 Euglenophyta	金藻门 Chrysophyta	甲藻门 Dinophyta	隐藻门 Cryptophyta	黄藻门 Xanthophyta
夏季 summer	52.59	11.21	12.93	12.07	3.45	3.45	2.59	1.72
秋季 autumn	45.12	15.85	14.63	8.54	4.88	4.88	3.66	2.44

## 2.2 群落优势种

以优势度指数  $Y > 0.02$  定为优势种, 2014 年 7 - 11 月在阳澄西湖现场调查共出现浮游植物优势类群为 6 门 13 属 18 种, 均以绿藻门、硅藻门和隐藻门为主(表 3)。从种类数量上看, 夏季(16 种)高于秋季(13 种)。其中隐藻门优势种在各月份均有出现, 为夏秋季主要优势种种类; 蓝藻门夏季(3 属 5 种)高于秋季(1 属 2 种), 其中微

小平裂藻夏季优势度(0.18)至秋季(0.41)有所上升, 但细胞密度数值上夏季较秋季高 6.22 倍; 点形平裂藻夏秋季优势度变化不大, 但细胞密度数值上夏季较秋季高 26.21 倍。结果表明夏季浮游植物以蓝藻门为主, 秋季喜清洁的金藻门和黄藻门种数较夏季有所上升, 且细胞密度占优势种总细胞密度的 15.38%, 远远高于夏季(0.43%)。

表 3 阳澄湖优势种优势度

Tab.3 The species and dominance of the dominant phytoplankton in Yangcheng Lake

优势种 dominant species	夏季 summer		秋季 autumn	
	优势度 dominance	细胞密度 cell abundance ( $\times 10^6$ cell/L)	优势度 dominance	细胞密度 cell abundance ( $\times 10^6$ cell/L)
微小平裂藻 <i>Merismopedia tenuissima</i> Lemm	0.18	46.90	0.41	7.54
点形平裂藻 <i>Merismopedia punctata</i> Meyen	0.04	27.26	0.03	1.04
小席藻 <i>Phormidium tenue</i> (Menegh) Gom	0.03	3.77	-	-
螺旋鱼腥藻 <i>Anabaena spiroides</i> Kleb	0.02	0.65	-	-
链状假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena catenata</i> Lauterb	0.12	4.81	-	-
小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i> Beij	0.03	0.62	-	-
简单衣藻 <i>Chlamydomonas simplex</i> Pasch	0.10	1.99	0.08	1.61
卵形衣藻 <i>Chlamydomonas ovalis</i> Pasch	0.03	0.88	0.05	0.98
球衣藻 <i>Chlamydomonas globosa</i> Snow	0.03	0.85	0.06	1.14
尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i> Uterm	0.06	3.07	0.05	6.70
卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i> Her	0.19	0.65	0.34	0.78
嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i> Her	0.05	0.73	0.04	1.68
梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i> Kütz	0.07	7.66	0.08	0.42
颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i> var	0.22	0.76	0.07	0.44
线形舟形藻 <i>Navicula graciloides</i> A. May	0.03	0.71	-	-
变形棕鞭藻 <i>Ochromonas mutabilis</i> Klebs	0.03	0.44	0.13	2.43
具尾鱼鳞藻 <i>Mallomonas caudata</i> Ivanov em. Krieger	-	-	0.02	0.54
小型黄丝藻 <i>Tribonema minue</i> (Wille) Haz	-	-	0.03	1.09

注: - 表示非优势种。

Note: - indicates it was not dominant species.

## 2.3 细胞密度和生物量

如表 4 和图 2 所示, 2014 年 7 - 11 月现场调查阳澄西湖浮游植物细胞密度变动幅度为  $(1.35 \pm 0.09) \times 10^6 \sim (8.17 \pm 0.58) \times 10^6$  cell/L,

平均为  $(3.99 \pm 4.00) \times 10^6$  cell/L。其中夏季浮游植物总细胞密度平均为  $(5.35 \pm 3.38) \times 10^6$  cell/L, 蓝藻门为  $(4.17 \pm 2.70) \times 10^6$  cell/L; 秋季平均为  $(1.94 \pm 5.09) \times 10^6$  cell/L, 蓝藻门为

$(0.62 \pm 0.88) \times 10^6$  cell/L。浮游植物生物量变动幅度为 $(0.74 \pm 0.11) \sim (2.27 \pm 0.19)$  mg/L, 平均为 $(1.41 \pm 1.05)$  mg/L;其中夏季浮游植物生物量平均为 $(1.71 \pm 0.62)$  mg/L, 高于秋季 $[(0.96 \pm 0.15)$  mg/L]。

从站点上看,阳澄西湖各采样点浮游植物细胞密度变动幅度为 $(1.19 \pm 0.91) \times 10^6 \sim (7.25 \pm 8.94) \times 10^6$  cell/L, 平均为 $(3.99 \pm 4.00) \times 10^6$  cell/L;其中进水口浮游植物细胞密度平均为 $(3.72 \pm 3.79) \times 10^6$  cell/L, 出水口平均为

$(4.05 \pm 3.89) \times 10^6$  cell/L,各断面藻类细胞密度空间分布特征表现为断面Ⅲ > Ⅳ > Ⅱ > Ⅰ。各采样点浮游植物生物量变动幅度为 $(0.58 \pm 0.21) \sim (2.05 \pm 1.18)$  mg/L, 平均为 $(1.41 \pm 1.05)$  mg/L;其中进水口浮游植物生物量平均为 $(1.50 \pm 0.69)$  mg/L, 高于出水口 $[(1.37 \pm 1.09)$  mg/L], 各断面藻类生物量空间分布特征表现为断面Ⅳ > Ⅲ > Ⅰ > Ⅱ, 与细胞密度空间分布特征不一致。

表 4 阳澄湖浮游植物细胞密度季节变化  
Tab. 4 Seasonal changes of phytoplankton abundance in Yangcheng Lake

时间 time	绿藻门 Chlorophyta	蓝藻门 Cyanophyta	硅藻门 Bacillariophyta	裸藻门 Euglenophyta	金藻门 Chrysophyta	甲藻门 Dinophyta	隐藻门 Cryptophyta	黄藻门 Xanthophyta
夏季 summer	14.15	65.69	5.40	0.90	0.22	0.44	10.30	2.90
秋季 autumn	18.11	15.76	16.51	0.26	10.86	0.01	33.25	5.24

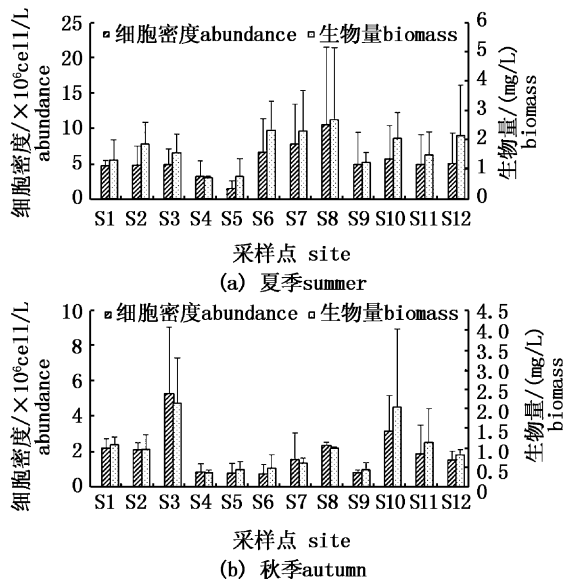


图 2 阳澄湖浮游植物细胞密度和生物量空间分布特征  
Fig. 2 Spatial distribution of algae abundance and biomass in Yangcheng Lake

## 2.4 群落结构多样性

调查结果显示(表 5),阳澄西湖浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数变动范围为 2.41 ~ 3.71, 平均为 2.97, 其中夏季平均为 2.44, 秋季平均为 3.33; Pielous 均匀度指数变动范围为 0.51 ~ 0.77, 平均为 0.66, 其中夏季平均为 0.55, 秋季平均为 0.73; Margalef 丰富度指数变动范围为 0.86 ~ 1.41, 平均为 1.11, 其中夏季平均为 1.02, 秋季平均为 1.18。

从站点上看,阳澄西湖各采样点 Shannon-Wiener 多样性指数变动范围为 2.43 ~ 3.41, 其中进水口平均为 2.90, 略低于出水口(2.93), 各断面 Shannon-Wiener 多样性指数空间分布特征表现为断面Ⅳ > Ⅰ > Ⅲ > Ⅱ; Pielous 均匀度指数变动范围为 0.60 ~ 0.72, 其中进水口平均为 0.65, 略低于出水口(0.66), 各断面 Pielous 均匀度指数空间分布特征表现为断面Ⅳ > Ⅱ > Ⅲ = Ⅰ; Margalef 丰富度指数变动范围为 0.68 ~ 1.38, 其中进水口平均为 1.04, 略高于出水口(1.00), 各断面 Margalef 丰富度指数空间分布特征表现为断面Ⅰ > Ⅳ > Ⅲ > Ⅱ。

## 2.5 Pearson 相关性分析

与浮游植物同期监测的湖泊水体环境因子值见表 6, Pearson 相关性分析表明阳澄西湖夏季藻类细胞密度与 pH、水温、 $\text{NO}_2^-$ -N 呈极显著正相关( $r = 0.653, r = 0.513, r = 0.480; P < 0.01$ ); 秋季藻类细胞密度与 DTN 呈显著正相关( $r = 0.473, P < 0.05$ ), 与 DTP 呈显著负相关( $r = -0.456, P < 0.05$ )。夏季藻类生物量与 pH、水温、 $\text{NO}_2^-$ -N 呈显著正相关( $r = 0.413, r = 0.339, r = 0.424; P < 0.05$ ); 秋季生物量与  $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  呈显著正相关( $r = 0.507, r = 0.495; P < 0.05$ )。结果表明阳澄西湖夏季浮游植物分布主要与 pH、水温、 $\text{NO}_2^-$ -N 呈正相关, 秋季则主要与  $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、DTN 和 DTP 有关。

表 5 阳澄湖浮游植物多样性指数动态变化

Tab. 5 Dynamic changes of phytoplankton diversity in Yangcheng Lake

站点 site	Shannon-Wiener 多样性指数		Pielous 均匀度指数		Margalef 丰富度指数	
	夏季 summer	秋季 autumn	夏季 summer	秋季 autumn	夏季 summer	秋季 autumn
S1	2.77	3.85	0.58	0.78	1.23	1.60
S2	2.84	3.55	0.57	0.75	1.39	1.31
S3	2.81	2.81	0.59	0.62	1.19	0.97
S4	2.24	2.72	0.54	0.76	0.76	0.56
S5	2.45	3.22	0.68	0.72	0.81	1.20
S6	2.87	3.41	0.61	0.77	1.11	1.17
S7	2.96	2.94	0.63	0.69	1.17	0.90
S8	3.01	2.87	0.59	0.66	1.48	1.02
S9	3.06	2.61	0.68	0.62	1.04	0.92
S10	3.39	3.45	0.70	0.73	1.30	1.19
S11	3.33	3.34	0.70	0.76	1.25	1.00
S12	2.63	2.93	0.59	0.68	1.04	0.93

表 6 阳澄湖藻类密度和生物量与水环境因子的相关性

Tab. 6 Correlation between phytoplankton abundance, biomass density and environmental factors in Yangcheng Lake

环境因子 environmental factors	夏季 summer			秋季 autumn		
	水质 water quality	$r_{\text{密度}}$	$r_{\text{生物量}}$	水质 water quality	$r_{\text{密度}}$	$r_{\text{生物量}}$
pH	7.58 ± 0.37	0.653 **	0.413 *	7.79 ± 0.68	-0.334	-0.262
DO/(mg/L)	5.63 ± 0.56	-0.117	-0.207	7.58 ± 0.75	0.374	0.200
温度/°C temperature	26.86 ± 1.56	0.513 **	0.339 *	17.66 ± 2.96	-0.294	-0.184
SD/cm	58.17 ± 18.62	0.141	-0.093	53.00 ± 13.08	-0.039	-0.160
水深/m depth	2.31 ± 0.05	0.061	0.151	2.28 ± 0.01	0.170	0.202
TP/(mg/L)	0.23 ± 0.05	0.284	0.055	0.20 ± 0.03	-0.189	-0.177
DTP/(mg/L)	0.17 ± 0.04	-0.010	-0.137	0.09 ± 0.02	-0.456 *	-0.389
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /(mg/L)	0.14 ± 0.02	0.070	0.040	0.06 ± 0.03	-0.395	-0.345
TN/(mg/L)	1.51 ± 0.35	0.307	0.240	2.06 ± 0.94	0.279	0.158
DTN/(mg/L)	1.27 ± 0.41	0.191	0.022	1.52 ± 0.30	0.473 *	0.316
NH <sub>3</sub> -N/(mg/L)	1.05 ± 0.27	0.245	0.083	0.44 ± 0.02	-0.056	-0.032
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N/(mg/L)	0.66 ± 0.12	0.480 **	0.424 *	0.88 ± 0.22	0.382	0.507 *
COD <sub>Mn</sub> /(mg/L)	3.64 ± 0.56	0.076	0.007	2.33 ± 0.02	0.356	0.495 *

注: \*\* 表示在 0.01 水平上存在极显著差异, \* 表示在 0.05 水平上存在显著差异。

Note: \*\* indicates the difference was extremely significant, \* indicates the difference was significant.

## 2.6 浮游植物与水环境因子相关关系的冗余分析

对经过筛选的 18 种浮游植物(表 7)及 13 个环境因子进行 DCA 分析,分析结果表明夏秋季 Lengths of gradient 第一轴均小于 3.0,适合进行 RDA(单峰模型)分析。由表 8 可知,夏季轴 I 和轴 II 的特征值分别为 0.144、0.118,秋季分别为 0.191 和 0.098;筛选的 13 种环境因子共能反映夏季 63.2%、秋季 61.2% 的物种信息量,两季的两个排序轴相关系数分别为 -0.1608、0.1575,表示两个物种排序轴几乎相互垂直;环境因子轴与物种排序轴之间的相关系数夏季为 0.736、0.831,秋季为 0.892、0.743,两季两个环境排序

轴的相关系数均为 0,且两季 Monte Carlo 置换检验所有排序轴均显示差异显著( $P < 0.05$ ),说明排序结果能很好地反映该水域浮游植物和环境因子的关系<sup>[22]</sup>。

通过手工预选变量分析,夏季 T、TN、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>和 DTP 4 个变量主要在轴 I 影响浮游植物的分布。夏季除微小平裂藻外的蓝藻门和绿藻门主要与 T、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>呈正相关,而硅藻门、甲藻门和隐藻门与 T、TN、DTP 呈负相关。秋季 pH、T、DO、COD<sub>Mn</sub>、DTN 5 个变量主要在轴 I 影响浮游植物的分布,其中蓝藻门、裸藻门均与 DTN、pH 和 T 呈正相关,隐藻门和黄藻门主要与 DO 呈正相关,与 COD<sub>Mn</sub>、pH 和 T 呈负相关;绿藻门和硅藻门分

布比较分散,SP24 和 SP25 主要与  $COD_{Mn}$  呈正相关,SP14 和 SP21 反之,SP9、SP13 主要与 DTN、pH 和 T 呈正相关,SP9、SP22 和 SP23 反之。RDA 分

析结果表明,夏季浮游植物分布的主要影响因子是 T、TN 和 DTP,而 pH、T、DO 和 DTN 为秋季藻类分布的主要影响因子(图 3)。

表 7 RDA 分析中的浮游植物物种代码  
Tab.7 Codes of planktonic algae species for RDA

代码 code	物种 species	代码 code	物种 species
SP1	微小平裂藻 <i>Merismopedia tenuissima</i> Lemm	SP14	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i> (Turp) de Bréb
SP2	点形平裂藻 <i>Merismopedia punctata</i> Meyen	SP15	斜生栅藻 <i>Scenedesmus obliquus</i> (Turp) Kutz
SP3	小席藻 <i>Phormidium tenue</i> (Menegh) Gom	SP16	颗粒栅藻 <i>Scenedesmus granulatus</i>
SP4	微小色球藻 <i>Chroococcus minutus</i> (Kütz) Näg	SP17	小形月牙藻 <i>Selenastrum minutum</i> Coll
SP5	尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i> Uterm	SP18	湖生卵囊藻 <i>Oocystis lacustris</i> Chod
SP6	卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i> Her	SP19	针晶蓝纤维藻 <i>Dactylocoopsis raphioides</i> Hansg
SP7	嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i> Her	SP20	糙纹囊裸藻 <i>Trachelomonas scabra</i> Playf
SP8	裸甲藻 <i>Gymnodinium aeruginosum</i> Stein	SP21	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i> Kützing
SP9	颗粒直连藻 <i>Melosira granulata</i> (Ehr.) Ralfs	SP22	简单衣藻 <i>Chlamydomonas simplex</i> Pasch
SP10	梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i> Kütz	SP23	卵形衣藻 <i>Chlamydomonas ovalis</i> Pasch
SP11	双头针杆藻 <i>Synedra amphicephala</i> Kütz	SP24	华美十字藻 <i>Crucigenia lauterbornei</i> Schm
SP12	四足十字藻 <i>Crucigenia tetrapedia</i> West	SP25	龙骨栅藻 <i>Scenedesmus cavinatus</i> Chod
SP13	四角十字藻 <i>Crucigenia quadrata</i> Morr	SP26	小型黄丝藻 <i>Tribonema minus</i> (Wille) Haz

表 8 阳澄湖 RDA 分析前两轴的统计特征  
Tab.8 Statistical characteristics of the first two axes of the RDA analysis from Yangcheng Lake

时间 time	轴 axes	1	2	3	4
夏季 summer	特征值 eigenvalues	0.144	0.118	0.056	0.012
	藻类物种与环境因子的相关性 Spec.-envi. correlations	0.736	0.831	0.664	0.474
	物种变异累计系数 Cum. percentage variance of species data	14.4	26.2	31.8	33.0
	物种-环境变异累计系数 Cum. percentage variance of spec.-envi. relation	43.6	79.3	96.4	100.0
秋季 autumn	特征值 eigenvalues	0.191	0.098	0.068	0.037
	藻类物种与环境因子的相关性 Spec.-envi. correlations	0.892	0.743	0.758	0.665
	物种变异累计系数 Cum. percentage variance of species data	19.1	29.0	35.7	39.5
	物种-环境变异累计系数 Cum. percentage variance of spec.-envi. relation	47.1	71.3	88.0	97.3

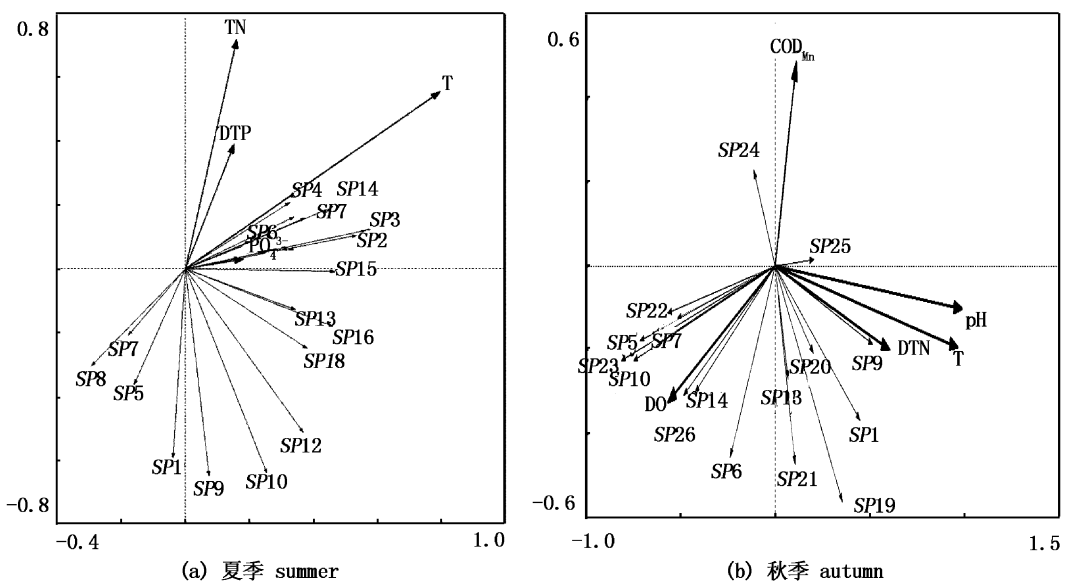


图 3 阳澄湖浮游植物物种-环境关系的 RDA 二维排序图  
Fig.3 RDA biplot of phytoplankton species and environmental variables in Yangcheng Lake

### 3 讨论

#### 3.1 浮游植物群落结构特征及生态学评价

研究结果表明,阳澄西湖共发现 142 种浮游植物,其中夏季种数高于秋季,且均以绿藻门、蓝藻门和硅藻门为主,这与 2008 - 2009 年阳澄西湖调查的藻类群落结构特征基本一致<sup>[24]</sup>。与历史资料<sup>[10,24]</sup>相比,2008 年同期铜绿微囊藻优势度最高(0.44),而本次调查优势种中以微小平裂藻优势度最高,微囊藻属未形成优势种,且该属种数较 2008 年减少 50%,表明鲢鳙滤食对微囊藻有一定的控制作用<sup>[25]</sup>。本次调查结果中发现藻类总生物量平均为 1.41 mg/L,分别较 2008 年减少 79%、较 2009 年减少 46%<sup>[24]</sup>,表明鲢鳙放养密度达到一定阈值后能降低浮游植物总生物量<sup>[26]</sup>。研究发现鲢鳙在 7、8 月份摄食率出现峰值<sup>[27]</sup>,统计结果中大型藻类 (>20 μm)对总现存量的贡献率 7 月份最低,此后逐月递增,表明鲢鳙对藻类生物量的影响主要表现为对大型藻类现存量的控制<sup>[28]</sup>。此外,夏秋季 Jaccard 种类相似性指数为 0.62,即两季种类组成仍有 62% 相似,表明该水域群落结构有一定演替但并未发生显著变化。

在本次调查中,阳澄西湖夏秋季优势种中发现大量富营养型(β-a-ms 型)水体的指示藻类<sup>[29]</sup>,可能与西湖与主要河道入湖口,因而水体营养盐含量较高有关<sup>[30]</sup>。蓝藻最适生长温度为 25 ~ 35 °C,调查期间夏季优势种以蓝藻门占绝对优势,其细胞密度占优势种总细胞密度的比例高达 81.96%。而到了秋季,水温降低,降雨量减少,水体流速渐缓,优势种中蓝藻门种类开始逐渐减少,而清洁水体指示种金藻门和黄藻门种数增加,指示该季水质状况优于夏季。结合多样性指数对水质的评价标准<sup>[31]</sup>,结果与污染指示种对水质的评价结果基本一致,表明阳澄西湖夏秋季水质总体显示为中污染,其中秋季水质状况优于夏季。

#### 3.2 浮游植物与水环境因子的关系

大量研究结果表明,水温、pH、营养盐等环境因素<sup>[32-33]</sup>对浮游植物水平分布影响较大。阳澄西湖进水口营养盐含量总体高于出水口,而藻类密度却低于出水口,数据显示主要是 11 月份出水口硅藻和隐藻藻类密度较其他月份高,分别是进水口同期监测结果的 3.44 倍、2.01 倍。分析

原因认为,一方面,刘霞等<sup>[34]</sup>认为高浓度的  $PO_4^{3-}$  有利于硅藻生长,FERIIS 和 LEHMAN 的研究中也发现 P 较 Si 对硅藻现存量限制作用更大<sup>[35]</sup>,11 月份出水口总磷含量(0.12 mg/L)高于进水口(0.09 mg/L), $PO_4^{3-}$  含量为进水口的 2 倍,从而可能导致该月份硅藻密度在出水口分布高于进水口。另一方面,RDA 分析结果显示卵形隐藻和尖针杆藻密度与  $COD_{Mn}$  呈负相关,除颗粒直链藻外硅藻和隐藻均与 DO 呈正相关关系,与 DTN、呈负相关关系,水质结果中进水口  $COD_{Mn}$  与 DO 均高于出水口,而 pH 低于出水口,从而可能导致进水口藻类密度低于出水口。此外,有学者认为硅藻和隐藻与蓝藻可能存在着竞争演替的趋势<sup>[36-37]</sup>,这与本文中秋季蓝藻密度百分比下降,而硅藻和隐藻上升的结果相吻合。

#### 参考文献:

- [1] 王家利,王芳. 盐湖微小型浮游植物多样性研究进展[J]. 生态学报,2014,34(2):282-293.  
WANG J L, WANG F. Biodiversity and research progress on picophytoplankton in saline lakes [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(2):282-293.
- [2] 柴毅,彭婷,郭坤,等. 2012 年夏季长湖浮游植物群落特征及其与环境因子的关系[J]. 植物生态学报,2014,38(8):857-867.  
CHAI Y, PENG T, GUO K, et al. Community characteristics of phytoplankton in Lake Changhu and relationships with environmental factors in the summer of 2012[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(8):857-867.
- [3] 李秋华,陈丽丽,夏品华,等. 贵州百花湖西河口浮游植物群落结构及与环境因子关系[J]. 湖泊科学,2011,23(4):612-618.  
LI Q H, CHEN L L, XIA P H, et al. Structure of phytoplankton community and its relationship with environmental factors at the estuary of Maixi River in Baihua Reservoir, Guizhou Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(4):612-618.
- [4] 王超,赖子尼,李新辉,等. 西江下游浮游植物群落周年变化模式[J]. 生态学报,2013,33(14):4398-4408.  
WANG C, LAI Z N, LI X H, et al. Annual variation pattern of phytoplankton community at the downstream of Xijiang River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(14):4398-4408.
- [5] 童琰,马明睿,林青,等. 滴水湖浮游植物时空分布动态及其影响因子[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(12):1499-1506.  
TONG Y, MA M R, LI Q, et al. Dynamics of spatial and

- temporal distribution of phytoplankton and related affecting factors in the Dishui Lake[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(12): 1499 - 1506.
- [6] 龙胜兴,陈椽,郭云,等. 红枫湖水库水体富营养化及浮游植物群落结构特征[J]. 中国环境监测, 2013, 29(1): 23 - 29.  
LONG S X, CHEN Y, GUO Y, et al. Phytoplankton's Characteristics of Community structure and Eutrophication in Hongfeng Lake Reservoir of GuiZhou [J]. Environmental Monitoring in China, 2013, 29(1): 23 - 29.
- [7] 黄享辉,胡初,雷腊梅,等. 南亚热带典型中小型水库浮游植物功能类群季节演替特征[J]. 生态环境学报, 2013, 22(2): 311 - 318.  
HUANG X H, HU R, LEI L M, et al. Seasonal succession of phytoplankton functional groups in typical small and medium-sized reservoirs in southern China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(2): 311 - 318.
- [8] 陈格君,周文斌,胡春华. 鄱阳湖五河入湖口浮游藻类及营养现状评价[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(9): 2048 - 2052.  
CHEN G J, ZHOU W B, HU C H. Assessment of Phytoplanktonic Diversity and Present Nutrition Status in the Five River Estuaries of Poyang Lake [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52(9): 2048 - 2052.
- [9] 王亚尼,周序协,张桂蓉,等. 大茶湖浮游藻类调查与水质初步评价[J]. 华中农业大学学报, 2013, 32(3): 118 - 123.  
WANG Y N, ZHOU X X, ZHANG G R, et al. Investigation of phytoplankton and preliminary evaluation of water quality in Dacha Lake [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2013, 32(3): 118 - 123.
- [10] 陈立婧,吴淑贤,彭自然,等. 2008年苏州阳澄湖浮游藻类群落结构与环境因子的 CCA 分析[J]. 生物学杂志, 2012, 29(6): 65 - 69.  
CHEN L J, WU S X, PENG Z R, et al. Canonical correspondence analysis between the phytoplankton community structure and environment factors of Yangcheng Lake in 2008 [J]. Journal of Biology, 2012, 29(6): 65 - 69.
- [11] 景明,李继影,刘孟宇,等. 阳澄湖浮游植物群落结构与环境因子的典范对应研究[J]. 环境科学与管理, 2014(11): 145 - 148.  
JIN M, LI J Y, LIU M Y, et al. Canonical correspondence analysis between phytoplankton community and environmental factors in Yangcheng Lake [J]. Environmental Sciences and Management, 2014(11): 145 - 148.
- [12] 施陈江,蔡春芳,徐升宝,等. 阳澄西湖围养滤食性鱼类的生态效益、经济效益跟踪调查[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(7): 4024 - 4026.  
SHI C J, CAI C F, XU S B, et al. Ecological and economical evaluation of planktivorous fish enclosure culture in West Yangcheng Lake [J]. Journal of Anhui Agriculture Sciences, 2011, 39(7): 4024 - 4026.
- [13] 陈伟民,黄祥飞,周万平,等. 湖泊生态系统观测方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.  
CHEN W M, HUANG X F, ZHOU W P, et al. Research methods for observation of Lake ecosystem [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2005.
- [14] 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: 23 - 900.  
HU H J, WEI Y X. The freshwater algae of China - systematics, taxonomy and ecology [M]. Beijing: Science Press, 2006: 23 - 900.
- [15] 韩茂森,束蕴芳. 中国淡水生物图谱 [M]. 北京: 海洋出版社, 1995: 2 - 296.  
HAN M S, SHU Y F. The Freshwater Biology Map of China [M]. Beijing: Ocean Press, 1995: 2 - 296.
- [16] 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: 88 - 284.  
State Environmental Protection Administration, the Monitor and Analysis Methods of Water and Wastewater Editorial Committee. The Monitor and Analysis Methods of Water and Wastewater [M]. 4th ed. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2002: 88 - 284.
- [17] 陈清潮,黄良民,尹健强. 南沙群岛及其邻近海区海洋生物多样性研究 [M]. 北京: 海洋出版社, 1994: 42 - 50.  
CHEN Q C, HUANG L M, YIN J Q. Studies on marine biodiversity of the Nansha islands and neighbouring waters [M]. Beijing: Ocean Press, 1994: 42 - 50.
- [18] SHANNON C E, WEAVER W. The mathematical theory of communication [M]. Urbana: Univ of Illinois Press, 1963.
- [19] PIELOU E C. The measurements of diversity in different types of biological collections [J]. Journal of Theoretical Biology, 1966(13): 131 - 144.
- [20] SOBALLE D M, KIMMEL B L. A large scale comparison of factor influencing phytoplankton abundance in rivers lakes and impoundments [J]. Ecology, 1987, 68(6): 1943 - 1954.
- [21] 陈家长,孟顺龙,尤洋,等. 太湖五里湖浮游植物群落结构特征分析 [J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1358 - 1367.  
CHEN J Z, MENG S L, YOU Y, et al. Characteristic of phytoplankton community in Lake Wuli, Lake Taihu [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(4): 1358 - 1367.
- [22] 胡芳,许振成,姚玲爱,等. 剑潭水库浮游植物群落特征与水环境因子关系研究 [J]. 环境科学学报, 2014, 34(4): 950 - 958.  
HU F, XU Z C, YAO L A, et al. Community structure of phytoplankton and its relationship with aquatic environment factors in Jiantan Reservoir [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(4): 950 - 958.
- [23] 李为星,徐玉萍,王丽卿,等. 上海市城郊河道夏季浮游植物群落结构及水质评价 [J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(3): 357 - 361.



- LI W X, XU Y P, WANG L Q, et al. Assessment of phytoplankton community structure and water quality in the seven suburb rivers of Shanghai in summer [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2013, 22(3): 357-361.
- [24] 吴淑贤. 阳澄湖浮游植物群落结构的研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.
- WU S X. The Research of Phytoplankton Community Structure of Yangcheng Lake in Suzhou [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012.
- [25] DATTA S, JANA B B. Control of bloom in a tropical lake: grazing efficiency of some herbivorous fishes [J]. Journal of Fish Biology, 1998, 53(1): 12-24.
- [26] XIE P, LIU J. Practical success of biomanipulation using filter-feeding fish to control cyanobacteria blooms: a synthesis of decades of research and application in a subtropical hypereutrophic lake [J]. The Scientific World Journal, 2001 (1): 337-356.
- [27] 李思发, 杨和荃, 陆伟民. 鲢、鳙、草鱼摄食节律和日摄食率的初步研究 [J]. 水产学报, 1980, 4(3): 275-283.
- LI S F, YANG H Q, LU W M. Preliminary reserash on diurnal feeding rhythmnd the daily ration for silver carp, bighead carp and grass carp [J]. Journal of Fisheries of China, 1980, 4(3): 275-283.
- [28] 孙育平. 营养盐加富, 滤食性鱼类和浮游动物对水库浮游植物群落结构的影响 [D]. 广州: 暨南大学, 2010.
- SUN Y P. Effects of Nutrient Enrichment, Filter-Feeding Fish and Zooplankton on Phytoplankton Community [D]. Guangzhou: Ji'nan University, 2010.
- [29] 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 Q J, MA P M, HU Z Y, 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.
- [30] 施陈江. 东太湖、阳澄西湖外源污染物通量及增殖放流的生态、经济效益 [D]. 苏州: 苏州大学, 2011.
- SHI C J. Study on exogenous pollutants flux in East Taihu Lake, Yangcheng Lake and ecological and economical evaluation of fish multiplication [D]. Suzhou: Soochow University, 2011.
- [31] 秦娇娇, 王艳. 浮游植物多样性指数的应用及评价 [J]. 沈阳师范大学学报: 自然科学版, 2014, 32(4): 502-505.
- QING J J, WANG Y. Application and evaluation of phytoplankton diversity indexes [J]. Journal of Shenyang Normal University: Natural Science, 2014, 32(4): 502-505.
- [32] 孙莹蓓, 罗淑蕊, 韦桂峰, 等. 大沙河水库浮游植物种类组成及季节性变化 [J]. 资源科学, 2014, 36(8): 1732-1738.
- SUN Y B, LUO L C, WEI G F, et al. Species Composition and Seasonal Variation in Phytoplankton at Dashahe Reservoir [J]. Resources Science, 2014, 36(8): 1732-1738.
- [33] 石晓丹, 阮晓红, 邢雅因, 等. 苏州平原河网区浅水湖泊冬夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析 [J]. 环境科学, 2008, 29(11): 2999-3008.
- SHI X D, RUAN X H, XING Y N, et al. Canonical Correspondence Analysis Between Phytoplankton Community and Environmental Factors in Winter and Summer in Shallow Lakes of Plain River Network Areas, Suzhou [J]. Environmental Science, 2008, 29(11): 2999-3008.
- [34] 刘霞, 陆晓华, 陈宇炜. 太湖浮游硅藻时空演化与环境因子的关系 [J]. 环境科学学报, 2012, 32(4): 821-827.
- LIU X, LU X H, CHEN Y W. Long-term evolution of planktonic diatoms and their relationships with environmental factors in Lake Taihu [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(4): 821-827.
- [35] FERRIS J A, LEHMAN J T. Interannual variation in diatom bloom dynamics: roles of hydrology, nutrient limitation, sinking, and whole lake manipulation [J]. Water Research, 2007, 41(12): 2551-2562.
- [36] 王少沛, 李卓佳, 曹煜成, 等. 微绿球藻、隐藻、颤藻的种间竞争关系 [J]. 中国水产科学, 2009, 16(5): 765-772.
- WANG S P, LI Z J, CAO Y C, et al. Interspecific competition among *Nannochloropsis* sp., *Cryptomonas erosa* and *Oscillatoria* sp. [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2009, 16(5): 765-772.
- [37] 刘霞, 陆晓华, 陈宇炜. 太湖浮游硅藻时空演化与环境因子的关系 [J]. 环境科学学报, 2012, 32(4): 821-827.
- LIU X, LU X H, CHEN Y W. Longterm evolution of planktonic diatoms and their relationships with environmental factors in Lake Taihu [J]. Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(4): 821-827.

## Community characteristics of phytoplankton in Yangcheng Lake and relationships with water environmental factors

DING Na<sup>1</sup>, ZHOU Yanfeng<sup>1,2</sup>, SONG Jiangteng<sup>1</sup>, JIANG Shulun<sup>1</sup>, GE You<sup>1</sup>, JIN Bei<sup>1</sup>, YOU Yang<sup>1,2</sup>

(1. *Wuxi Fisheries College, Nanjing Agriculture University, Wuxi 214081, Jiangsu, China*; 2. *Scientific Observing and Experimental Station of Fishery Resources and Environment in the Lower Reaches of the Changjiang River, Ministry of Agriculture, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, Jiangsu, China*)

**Abstract:** An investigation was conducted in Yangcheng Lake from July to November, 2014, Pearson correlation analysis and redundancy analysis (RDA) were applied to analyze the relationship between the phytoplankton community structure and water parameters. 142 species, 68 genera and 8 phyla were identified, including Chlorophyta (63 species, accounting for 44.37%), Bacillariophyta (27 species), Cyanophyta (22 species). The number of Chlorophyta was the highest in dominant species, while Cyanophyta was with the highest density. 61.11% of the dominant species were indicating algae of rich nutritional water. Abundance and biomass of phytoplankton during summer [averaging  $(3.99 \pm 4.00) \times 10^6$  cell/L and  $(1.41 \pm 1.05)$  mg/L, respectively] were considerably higher than those during autumn. Besides, algal density was mainly composed of Cyanophyta, while biomass was mainly composed of diatoms. The results showed that the water quality in Yangcheng Lake was moderately-polluted and the water during autumn was better than summer. The results of Pearson correlation analysis showed that the primary factors affecting the structure of phytoplankton community were identified to be pH, Tem and  $\text{NO}_2^-$ -N content during summer. Contents of  $\text{NO}_2^-$ -N,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ , DTN and DTP were the main factors affecting the structure of phytoplankton community during autumn. RDA results indicated that the key environmental factors influencing the phytoplankton assemblages were Tem, TN and DTP, whereas pH, Tem, DO and DTN were the key factors during autumn.

**Key words:** phytoplankton; community structure; numerical simulation; redundancy analysis; seasonal changes