不同鱼类养殖方式对长江中游湖泊浮游植物群落的影响及其季节动态[1]

张映雪[1,2],王瑞[1,2],屈霄[1,2]，夏文彤[1,2],辛未[1]，郭传波[1]，陈宇顺[1,2]

（1.中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室，湖北武汉 430072;2.中国科学院大学，北京 100049）

【摘 要】:湖泊鱼类养殖是非常重要的一种水产养殖方式,然而不同鱼类养殖和管理方式对湖泊浮游植物群落的影响及其季节动态尚不明确。2016 年 3 月~2017 年 1 月按季度调研了长江中游 9 个湖泊的浮游植物，所研究湖泊包括以下 4 组：水库极低密度放养组（SR 组）、禁养组（SN 组）、低密度养殖组（SL 组）和高密度养殖组（SH 组）。研究表明：4 组湖泊共鉴定出浮游植物 8 门 110 属，以绿藻、硅藻和蓝藻为主。水库组优势种季节演替明显，其余 3 组均存在比较稳定的优势种，其中禁养组与高密度养殖组为平裂藻，低密度养殖组为假鱼腥藻。4 组湖泊浮游植物丰度的季节变化规律不同,依赖于蓝藻优势度的变化。根据浮游植物多样性指数判断,4 组湖泊水体污染状态（即营养状态）存在季节差异，Shannon-Wiener 指数与 Pielou 指数对水体污染状态的评价结果较为一致。对 4 组湖泊四季的浮游植物的数量进行了层序聚类分析与非度量多维尺度分析（NMDS）,结果显示水库组单独为一类；禁养组与高密度养殖组除了夏季外，其余季节均为一类。不同鱼类养殖方式对湖泊浮游植物群落的结构及季节动态产生了一定的影响，然而短期的禁养并没有明显改变湖泊浮游植物群落。

【关键词】:长江中游湖泊　鱼类养殖　季节　浮游植物群落

【中图分类号】:Q178.51+3　　**【文献标识码】**:A**【文章编号】**:1004-8227（2018）10-2260-10

DOI：10.11870/cjlyzyyhj201810012

长江中游地区河湖纵横、水网交织，水生生物资源丰富，是我国重要的水产品基地[1]。2015 年，湖北省年产淡水产品 455.89x10^{4}t,连续 20a 领跑全国[2]。过度的水产养殖在满足人类生存的需求的同时，却也破坏了生态环境，导致了湖泊或沿海区的富营养化[3,4]。20 世纪 80 年代，Som-mer 等[5]总结了淡水水体中浮游生物季节演替的模式（PEG-model），该模式围绕光照、营养盐及浮游动物等因素对浮游植物的作用，描绘了浮游植物的季节演替格局。该模式对浮游植物生物量的季节演替模式及调控机制的理解在很多情况下都很适用，但似乎低估了更高营养级生物如鱼的影响[6]。亚热带湖泊不同于温带湖泊，其中生活有高密度的滤食性鱼类[7]，大型潘类少而小型浮游动物占优势[8,9]，浮游动物对浮游植物的下行效应不是很强[10~13]。鲢、鳙属于滤食性的鱼类，终生主要滤食水体中的浮游动植物[14,15],常被用来控制富营养化湖泊中藻类的过度生长[16]。滤食性鱼类对水体浮游植物群落及营养盐的影响因鱼体大小、放养密度、食物供给及环境条件的差异而不同[17]。围隔实验、池塘养殖实验研究了鱼类养殖对浮游植物群落的影响[18~22]，但这些实验终究与湖泊存在诸如面积小、研究周期不能过长等差异，可能不足以全面反应

[1]**收稿日期**：2017-12-27；**修回日期**：2018-02-08
基金项目：中国科学院百人计划项目（Y45Z041201、Y623021201）；中国科学院重点部署项目（ZDRW-ZS-2017-3-2）;以及淡水生态与生物技术国家重点实验室项目（2016FBZ10）
作者简介：张映雪（1992~）女，硕士研究生，主要从事水生态系统健康研究.E-mail:yingxuezhang92@qq.com
*通讯作者 E-mail：yushunchen@ihb.ac.cn

不同鱼类养殖方式对湖泊浮游植物群落组成、结构、丰度、物种多样性及演替等影响。

本研究旨在通过一周年不同季节在湖泊的野外取样和室内分析，了解不同鱼类养殖方式下湖泊浮游植物群落的季节动态，并尝试回答下面两个问题：（1）不同鱼类养殖方式对长江中游湖泊浮游植物群落有怎样的影响？（2）在不同鱼类养殖方式下湖泊浮游植物群落的季节动态为何？

1 材料与方法

1.1 采样湖泊与湖泊分组

本研究依据前期的调查结果选择了湖北省 9 个以养殖为主的远郊湖泊作为研究对象。这 9 个湖泊依据鱼类养殖强度的差异被分为以下 4 组（表 1):(1)水库组(SR 组，suburban reservoir group),主要是些天然水库，是武汉市的备用水源，其中少量放养鲢、鳙，放养量约为 90kg/hm^2,每年捕捞；(2)禁养组(SN 组，suburban non-aquaculture group),已禁养 2a，不再放养任何鱼类；(3)低密度养殖组(SL 组，suburban low density aquaculture group),低密度放养鲢、鳙，放养量约为 350kg/hm^2,养殖过程中不投饵，每年捕捞；(4)高密度养殖组(SH 组，suburban high density aquaculture group),高密度鳙寧、鳙，放养量约为 1200kg/hm^2,投喂 5500kg/hm^{2}和料，每年捕捞。

表 1 长江中游不同鱼类养殖方式的湖泊及采样时间

Tab. 1 Lakes in different fish culture groups and sampling dates in the middle reach of the Yangtze River Basin, China

分组	湖泊名称	代码	面积 (hm^2)	水深 （m）	采样时间			
					春季	夏季	秋季	冬季
水库组（SR 组）	院基寺水库	SR1	556	12.3	2016-03-24	2016-07-27	2016-11-20	2017-01-12
	夏季寺水库	SR2	2 280	17.1	2016-03-24	2016-07-27	2016-11-20	2017-01-12
	梅店水库	SR3	1 170	20.9	2016-03-24	2016-07-27	2016-11-20	2017-01-12
禁养组（SN 组）	柱木湖	SN1	20	2.5	2016-03-23	2016-07-26	2016-11-13	2017-01-15*
低密度养殖组（SL 组）	黄龙潭	SL1	241	2.1	2016-03-26	2016-07-28	2016-11-04	2017-01-14
	官莲湖	SL2	404	4.0	2016-03-27	2016-07-28	2016-11-10	2017-01-15
高密度养殖组（SH 组）	野湖	SH1	181	1.4	2016-03-24	2016-08-01	2016-12-06	2017-01-15
	金堆湖	SH2	35	1.5	—	2016-07-28	2016-11-19	—
	独沧湖	SH3	30	2.3	—	2016-07-28	2016-11-19	2017-01-14

注:“—”没有样品；“ #”，因为湖泊水位下降，仅可采集到 1 个点的样品.

1.2 样品的采集与处理

2016 年 3 月～2017 年 1 月按季度对 9 个湖泊进行浮游植物样品的采集，采样过程中，因为一些不可抗因素，可采样点数及湖泊数有所调整，具体的采样湖泊及时间安排见表 1。采样时，各个湖泊均于敞水区设 3 个站点，位置依湖泊的形态而定。浮游植物定性样品用 25#浮游生物网在水体表层“∞”型缓慢匀速拖行 3～5min 采集，并加 4%福尔马林溶液固定，带回实验室后在显微镜 Olympus CX40 下参照文献资料[23~27]进行分类鉴定，鉴定到属。定量样品则取表层 0.5m 处水样 1L，装于样品瓶内，现场用 10ml 鲁哥试液固定，经 48h 静置后浓缩至 30～100ml 不等，再取 0.1ml 于计数框内，在 40 倍物镜下采用目镜视野法计数细胞个数（群体的藻类如微囊藻，直接计数细胞个数）[28]。

1.3 数据处理与分析

计算优势度 $Y_i = \frac{n_i}{N} \times f_i$，Shannon-Wiener 指数 $H' = -\sum_{i=1}^{S} \frac{n_i}{N} \log_2 \frac{n_i}{N}$，Margalef 指数 $D_{Ma} = \frac{S-1}{\ln N}$ 和 Pielou 指数 $J = \frac{H'}{\log_2 S}$，式中，N 为总丰度，n_i 为属 i 的绝对丰度，f_i 为第 i 属在各站点出现的频率，S 为群落中属的数目[29,30]。Y_i〉0.02 的属定为优势属[29]。使用 Pearson 相关和 Spearman 等级相关分析浮游植物物种丰富度、丰度与多样性指数间的相关性，通过湖泊浮游植物多样性指数的值评价各组湖泊的水质[31~33]。

采用双因子方差分析（two-way ANOVA）分析养殖强度和季节这两个因素对浮游植物丰度的影响有无交互作用，结果表明两者间存在交互作用（表 2），采用单因子方差分析（one-way ANOVA）分别分析同一季节各组湖泊间浮游植物丰度的差异及同一组湖泊不同季节间浮游植物丰度的差异。单因子方差分析时，若浮游植物丰度数据不满足正态性，则采用 log10（X+1）进行转换。用软件 SPSS20.0 自带的方差齐性检验（Levene test）来检验数据的方差齐性，方差齐性时，使用 LSD(theLeast-SignificantDifference)法进行多重比较；若方差不齐，则使用 Games-Howeir 法进行多重比较。所有统计分析的显著性水平均定为 0.05。

表 2 分组及季节两因素对浮游植物丰度 影响的两因子方差分析结果

Tab. 2 Two-way (group and season) ANOVA of phytoplankton abundance

参数	变异来源	自由度	F 值	P
总丰度	季节	3	193.786	<0.001
	分组	3	33.059	<0.001
	季节*分组	9	4.842	<0.001

采用多元统计分析软件 Primer6.0 中的层序聚类分析(Hierarchical Cluster Analysis)和非度量多维尺度分析(Non-metric Multi-dimensional Scal¬ing,NMDS）进一步分析不同季节不同鱼类养殖强度湖泊的浮游植物群落结构特征。为降低稀有种对分析结果的影响，先对浮游植物丰度进行#转换，之后计算 Bray-Curtis 相似性系数，再对得到的相似性系数矩阵进行聚类分析和 NMDS 分析，分别得到聚类图和排序图[34]。层序聚类分析时采用了组平均（GroupAverage）的方法。

2 结果

2.1 种类组成及优势属

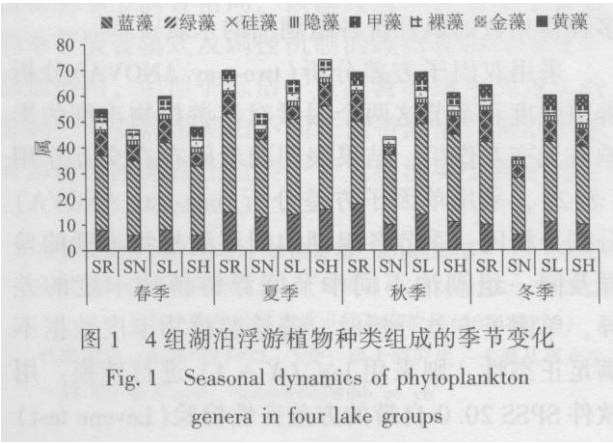

图 1 4 组湖泊浮游植物种类组成的季节变化

Fig. 1 Seasonal dynamics of phytoplankton genera in four lake groups

本次研究共鉴定出浮游植物 8 门 110 属，其中绿藻种类最多 57 属，蓝藻 22 属，硅藻 16 属，。甲藻、裸藻、金藻各 4 属，隐藻 2 属，黄藻 1 属。图 1 为四组湖泊浮游植物种类组成的季节变化情况。从总属数来看，SN 组全年相对较少；从种类组成来看，4 组湖泊全年均以绿藻、硅藻和蓝藻为主。

SR 组湖泊主要优势属季节演替明显，春季时为球囊藻（Sphaerocystis,Y=0.13）、十字藻（Crucige-nia，0.12）、小环藻（Cyclotella，0.28）和锥囊藻（Dinobryon，0.12）;夏季时为微囊藻（Microcystis,0.72）和长抱藻（Dolichospermum,0.07）;秋季时为假鱼腥藻（Pseudanabaena，0.28）、浮鞘丝藻（Planktolyngbya,0.16）、微囊藻（0.08）和脆杆藻（Fragilaria，0.07）;冬季时为蓝纤维藻（Dactylococcopsis,0.12）、浮生直链藻（0.12）、微囊藻（0.08）和小环藻（0.07）。SN 组湖泊春季的主要优势属为平裂藻（Merismopedia,0.23）、栅藻（Scenedes-maceae,0.11）、四星藻（Tetrastrum，0.09）和小环藻（0.09）;夏季的主要优势属为平裂藻（0.34）、假鱼腥藻（0.34）和浮鞘丝藻（0.19）;秋、冬两季均以平裂藻占绝对优势，优势度分别为 0.85 和 0.61。SL 组湖泊春季时以泽丝藻（Limnothrix，0.28）、假鱼腥藻（0.16）优势度较大；夏季时以浮鞘丝藻（0.47）和假鱼腥藻（0.38）优势度最大;秋季时以平裂藻（0.25）、假鱼腥藻（0.11）、浮生直链藻（0.08）和蓝纤维藻（0.07）优势度最大;冬季时以假鱼腥藻（0.21）和锥囊藻（0.18）优势度最大。SH 组湖泊春季时以平裂藻（0.14）、假鱼腥藻（0.08）、栅藻（0.14）、小球藻（Chlorella，0.09）、月牙藻（SeZenastrum,0.08）优势度最大;夏季时以平裂藻（0.40）和微囊藻（0.33）优势最大；秋季时以平裂藻（0.65）占绝对优势；冬季时以平裂藻（0.21）、栅藻（0.08）、纤维藻（Ankistrodsemus,0.07）、浮生直链藻（0.08）和隐藻（Cryptomonas,0.07）的优势度最大。

2.2 丰度及其组成

4 组湖泊的浮游植物丰度变化规律不完全相同（表 3）。SR、SN 及 SH3 组浮游植物丰度秋季时最大，而 SL 组夏季时最大。SR 组夏、秋季的浮游植物丰度显著高于春、冬季。SN 组春、夏、秋三季浮游植物丰度差异显著。SL 组夏季的浮游植物丰度最高，并显著高于其他各季节。SH 组冬季的浮游植物丰度最低，并显著低于其他各季节。

表 3 浮游植物丰度(cells/L)的单因子(季节)方差分析及多重比较结果

Tab. 3 One way (season) ANOVA and multi-comparisons of phytoplankton abundance (cells/L)

分组	春季	夏季	秋季	冬季	F 值	P
SR 组	$(6.53\pm1.21)\times10^{5b}$	$(1.00\pm1.03)\times10^{7a}$	$(1.26\pm1.10)\times10^{7a}$	$(9.01\pm3.07)\times10^{5b}$	$F_{(3,32)}=28.705$	<0.001
SN 组	$(5.52\pm0.79)\times10^{7c}$	$(1.32\pm0.11)\times10^{8b}$	$(6.21\pm0.32)\times10^{8a}$	$1.45\times10^{8\#}$	$F_{(2,6)}= 472.573$	<0.001
SL 组	$(4.69\pm4.39)\times10^{7b}$	$(1.91\pm0.44)\times10^{8a}$	$(4.17\pm2.04)\times10^{7b}$	$(1.22\pm0.54)\times10^{7b}$	$F_{(3,20)}= 35.850$	<0.001
SH 组	$(5.95\pm0.34)\times10^{7b}$	$(2.16\pm1.79)\times10^{8ab}$	$(2.64\pm0.69)\times10^{8a}$	$(3.58\pm0.99)\times10^{7c}$	$F_{(3,32)}= 13.504$	<0.001

注：同一组中，“平均值±标准差”后标有不同字母的季节之间差异显著;#，仅一个值，未参与单因子方差分析.

表 4 浮游植物丰度(cells/L)的单因子(分组)方差分析及多重比较结果

Tab. 4 One way (group) ANOVA and multi-comparison of phytoplankton abundance (cells/L) in four lake groups

季节	SR 组	SN 组	SL 组	SH 组	F 值
春季	$(6.53\pm1.21)\times10^{5b}$	$(5.52\pm0.79)\times10^{7a}$	$(4.69\pm4.39)\times10^{7ab}$	$(5.95\ \pm\ 0.34)\times10^{7a}$	63.510
夏季	$(1.00\pm1.03)\times10^{7b}$	$(1.32\pm0.11)\times10^{8a}$	$(1*.91\ \pm\ 0.44')\times10^{8a}$	$(2.16\pm1.79)\times10^{8a}$	28.568
秋季	$(1.26\pm1.10)\times10^{7d}$	$(6.21\pm0.32)\times10^{8a}$	$(4.17\pm2.04)\times10^{7c}$	$(2.64\pm0.69)\times10^{8b}$	56.445
冬季	$(9.01\pm3.07)\times10^{5c}$	$1.45\times10^{8\#}$	$(1.22\pm0.54)\times10^{7b}$	$(3.58\pm0.99)\times10^{7a}$	206.024

注：同一季节，“平均值±标准差”后标有不同字母的鱼类养殖组之间差异显著，#仅一个值，未参与单因子方差分析.

同一季节不同组湖泊的浮游植物丰度存在显著差异（表 4）。春季时，SR 组浮游植物丰度最低，显著低于 SN、SH 两组，而与 SL 组无显著差异；SN、SL、SH3 组间亦没有显著差异。夏季时，SR 组浮游植物丰度显著低于其余 3 组，而这 3 组间差异不显

著。秋季时，4 组浮游植物丰度间差异两两显著，SN 组最高，SH 组、SL 组、SR 组依次降低。冬季时，SN 组浮游植物丰度最高，SR、SL、SH3 组的浮游植物丰度间差异两两显著，且 SH 组显著高于 SL 组和 SR 组。

夏、秋两季时 4 组湖泊浮游植物丰度均以蓝藻占绝对优势，绿藻次之（图 2）。春、冬两季时，各组湖泊蓝藻优势相对下降，绿藻比例上升，硅藻、金藻及隐藻的比例也有不同程度上升（图 2）。SR 组春季时，硅藻和金藻对浮游藻类细胞密度贡献突出，分别占总数的 29.25%、12.23%;冬季时，硅藻占总体的 24.11%，隐藻及金藻分别贡献了总体的 6.21%和 5.02%。SN 组春季时，硅藻占总体的 11.01%,隐藻占总体的 1.29%;冬季时，硅藻占总体的 7.23%，隐藻占总体的 1.82%。SL 组春季时，硅藻占 6.59%，金藻占 1.57%;冬季时，金藻占 19.81%，硅藻占 8.18%，隐藻占 2.88%。SH 组春季时，硅藻、隐藻各占 6.25%，5.42%；冬季时硅藻、隐藻各占 14.63%，10.70%。

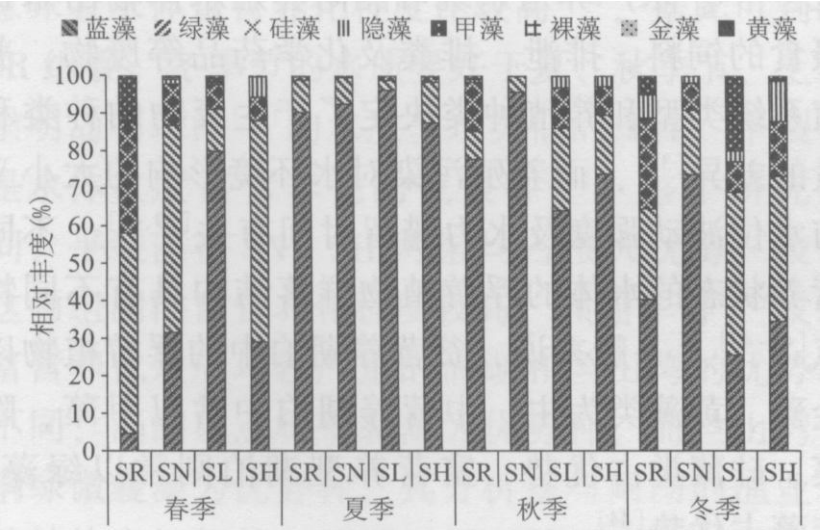

图 2　4 组湖泊浮游植物各门类相对丰度组成的季节变化

Fig. 2　Seasonal dynamics of relative abundance of all phytoplankton phyla in four lake groups

2.3 多样性指数

4 组湖泊的 3 种浮游植物多样性指数的数值见表 5。各组湖泊的浮游植物 Shannon-Wiener 指数的季节变化与 Pielou 指数的季节变化规律一致。所有采样点浮游植物丰度 N、物种丰富度 S 与 3 种多样性指数的 Pearson 相关和 Spearman 等级相关的相关系数及显著性结果（表 6）显示，D_{Ma}与 S 相关性很高，H’与 J 相关性很高。

根据 Margalef 丰富度指数的值，除春季的 SR 组及冬季的 SN 组属于中污染型，SR 组的秋季和冬季处于清洁状态，其他各季节的各组均属于轻污染型[31]。根据 Shannon-Wiener 多样性指数的值，春季时的 4 组、秋季的 SR 组和 SL 组、冬季的 SR 组、SL 组、SH 组均处于轻度污染或无污染状态，其余各季节的各组均属于中污染型[32]。根据 Pielou 均匀度指数的值，4 组春季和冬季时水质较好，均处于轻度污染或无污染状态；夏季时水质较差，处于中度污染状态。秋季时，SR 组和 SL 组水质较好，SN 组污染严重,SH 组中度污染[31]。综合看来,Shannon-wiener 指数与 Pielou 指数对湖泊营养状态的评价比较一致,这样的结果与 Pearson 相关、Spearman 等级相关的结果一致。Margalef 指数与物种丰富度相关性很高，其对湖泊营养状态的评价结果对物种丰富度的依赖程度较强[33]。

表 5 4 组湖泊的浮游植物多样性指数

Tab. 5 Phytoplankton diversity indices in four lake groups

分组	指数	春季	夏季	秋季	冬季
SR 组	Shannon-Wiener 指数 H’	3.05±0.26	2.39±1.02	3.43±0.47	3.64±0.45
	Magarlef 丰富度指数 D_{Ma}	1.35±0.39	1.68±0.41	2.48±0.45	2.34±0.36
	Pielou 均匀度指数 J	0.73±0.03	0.50+0.21	0.64±0.06	0.72±0.08
SN 组	Shannon-Wiener 指数 H’	3.91±0.16	2.37±0.10	1.09±0.19	2.46#
	Magarlef 丰富度指数 D_{Ma}	2.04±0.21	2.07±0.15	1.70±0.12	1.76*
	Pielou 均匀度指数 J	0.75±0.02	0.45±0.02	0.21±0.03	0.48*
SL 组	Shannon-Wiener 指数	2.96±0.86	1.84±0.61	3.84±0.16	3.19±0.40
	Magarlef 丰富度指数 D_{Ma}	1.91±0.26	2.00±0.16	2.20±0.16	1.81±0.30
	Pielou 均匀度指数	0.59±0.17	0.35±0.11	0.73±0.03	0.65±0.07
SH 组	Shannon-Wiener 指数 H’’	3.94±0.13	2.69±0.53	2.40±0.70	3.96±0.13
	Magarlef 丰富度指数 D_{Ma}	1.71±0.36	2.24±0.29	1.91±0.13	2.30±0.14
	Pielou 均匀度指数 J	0.80±0.02	0.50±0.09	0.46±0.13	0.74±0.02

注:#，因为 SN 组湖泊冬季只有一个采样点，所以只有一个值.

表 6 2016-2017 年度浮游植物物种丰富度、丰度与 3 种多样性指数间的 Pearson 相关(上三角)和 Spearman 等级相关(下三角)的相关系数

Tab. 6 Pearson (upper triangle) and Spearman rank (lower triangle) correlation coefficients between species richness, abundance of phytoplankton and three diversity indices in 2016-2017

Magarlef 丰富度指数 DMa		Shannon-Wiener 指数 H’	Pielou 均匀度指数 J	物种丰富度 S	浮游植物丰度 N(cells/L)
DMa		0.442 **	0.185	0.858**	-0.09
H’	0.518**		0.953 **	0.15	-0.624 **
J	0.195	0.905 **		-0.142	-0.691 **
S	0.802**	0.188	-0.132		0.288**
N	0.001	-0.444 **	-0.582 **	0.504 **	

注：** P<0.01.

2.4 群落分析

在 19.34%的相似性水平上，湖泊浮游植物群落可明显地分为水库组群和其余 3 组群两类(图 3(a))。在 29.08%的相似性水平上，水库组可进一步分为春、冬季群落和夏、秋季群落两类(图 3(a))。在 32.13%的相似性水平上，除 SR 组外其他组的群落被聚为两类，SL 组的春、冬季群为一类，剩下的群落又聚为另类。在 53.71%的相似性水平上，所有的湖泊聚为 13 类，即 SL1、SL2、SN1 及 SH2 的夏季群为一类；SH1、SH3 的夏季群，SH1、SH2、SH3 及 SN1 的秋季群为一类；SL1 与 SL2 的秋季群为一类；SH1、SH2、SN1 的冬季群和 SN1 与 SH1 的春季群为一类；SL2 春季、SL1 冬季、SR1 夏季及 SR2 秋季的群落各自为一类；SL2 冬季群及 SL1 春季群为一类;SR1 与 SR3 的秋季群为一类；SR 组的春季群和冬季群分别为一类。NMDS 排序分析得到的胁迫系数(Stress)为 0.09,小于 0.10,表明得到的排序图(图 3(b))可以较好地解释群落之间的相似关系[35]。

3 讨论

3.1 种类组成及优势属

水体中浮游植物的种类组成与动态受物理因子、化学因子、生物因子和水文因子的综合调控[36,37]。水产养殖系统可能向养殖水体输出未被摄食的饲料、排泄、排粪及化学药品等废物，养殖系统类型和养殖种类决定了产生废物的种类和量的差异[38]，而养殖污染对水环境影响的大小又与水位波动强度及水力滞留时间有关[39,40]。不同营养状态的水体的浮游植物群落结构具有不同特点[41~43]。一般来说，贫营养湖泊中的浮游植物以金藻、黄藻类为主，中营养湖泊中常以甲藻、隐藻、硅藻类占优势，富营养型湖泊则常以绿藻、蓝藻占优势[44]。

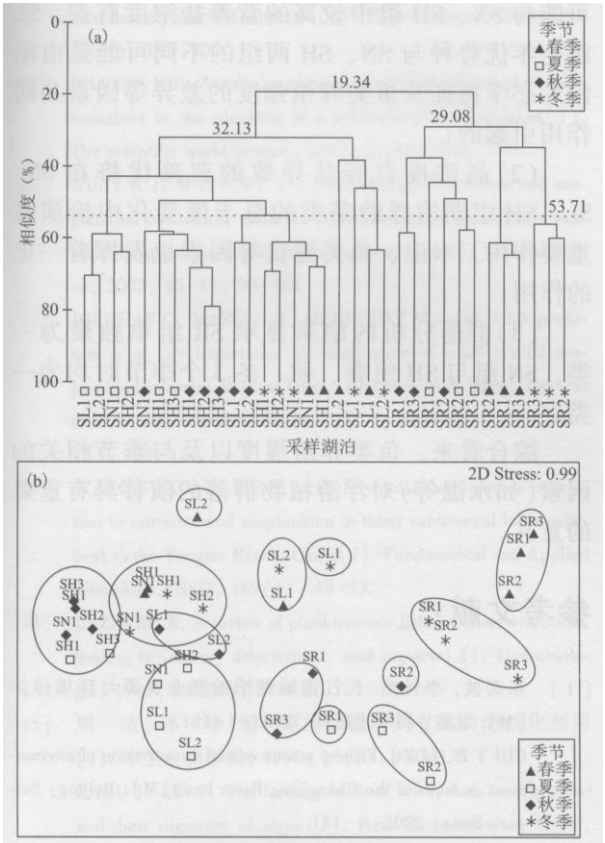

图 3　2016~2017 年度各采样湖泊浮游植物样品的（a）聚类图和（b）排序图（采样湖泊代码见表 1）

Fig. 3　Dendrogram of hierarchical clustering (a) and non-metric multidimensional scaling ordinations (b) on phytoplankton community in all sampling lakes in 2016-2017 (Note: Codes for lakes were provided in Table 1)

本研究中绿藻、硅藻和蓝藻是构成 4 组湖泊浮游植物的主要类群，这与很多已报道的国内湖泊的结果相似[20, 45,46]。SR 组水库优势属季节演替明显，四季中除温度极高的夏季外，硅藻均占有较大的优势。一般认为，硅藻型的浮游植物群落是水质污染较轻水体的典型特征，而蓝藻型则意味着水体富营养化程度比较高[47]，据此可判断 SR 组春、冬季节的水质要好于夏、秋季节，上海崇明岛明珠湖[48]的水质呈现类似的规律。平裂藻是水体重度富营养化的代表种[44]。整个研究期间，平裂藻在 SN、SH 两组均占很大优势，表明这两组湖泊富营养化程度较高。顾谢军等[49]发现富营养化效应均较严重的漏湖和竺山湾的优势种不同，漏

湖以点状平裂藻为优势种，而竺山湾以铜绿微囊藻为优势种，其分析这与两湖的渔业养殖结构密切相关，滿湖以鲢、鳙为主，且鲢、鳙放养量大，可有效控制微囊藻。SN 组与 SH 组全年以平裂藻占绝对优势，可能与其正在开展的或曾经开展的鱼类养殖活动有关。鱼类养殖活动，一方面改变了水体的藻类组成，一方面为水体和沉积物积累了丰富的营养盐，而 SN 组正在推行的禁渔措施，可能更进一步维护了平裂藻的优势。SL 组湖泊的全年优势种假鱼腥藻，被认为是热带富营养化水体中的代表种类[50,51]，表明 SL 组水体发生了一定程度的富营养化。SL 组湖泊全年以假鱼腥藻占较大优势，可能与鲢、鳙的放养有关[52]，也可能与其水体浅、面积大，水体透明度低和热稳定性差有关[53]。

3.2 丰度及其组成

在热带、亚热带地区，光照和温度的季节性变化没有温带地区那么显著，如果水体中氮、磷的营养水平比较高，那么蓝藻很可能成为全年的优势类群[53,54]，其细胞密度的高低将决定浮游藻类细胞总密度的大小。SR 组浮游植物总丰度夏、秋季节高，春、冬季节低，蓝藻、绿藻细胞密度也呈现这样的趋势，这一结果与武汉的大东湖生态水网区[55]和山东的东平湖[56]的发现一致。SN、SH 两组的浮游植物总丰度与蓝藻细胞密度变化一致，特别是平裂藻。SL 组浮游植物总丰度亦与蓝藻细胞密度变化一致。

整个研究期间，SR 组的浮游藻类细胞密度始终低于其他 3 组曾从事鱼类养殖或正进行鱼类养殖的湖泊的浮游藻类细胞密度。这可能主要与 SR 组放养密度低，营养盐浓度低有关（王瑞等，尚未发表）。此外，SR 组均为水库，水较深，而采样时仅采集了表层水体，这也可能是造成 SR 组浮游植物密度最低的原因之一。春季时，SL 组以丝状蓝藻假鱼腥藻和泽丝藻占绝对优势，与 SN、SH 两组浮游藻类细胞密度差异不显著。假鱼腥藻和泽丝藻细胞中辅助捕光色素的含量比较高，能耐受高度的光限制[57]，经常在光限制比较明显的不稳定的浅水水体中同时成为优势种类[58]。夏季时，水温较高，蓝藻生长旺盛，各组的蓝藻相对丰度在 80%以上，朱生博等[59]在 3 种放养（单养三角帆蚌，蚌与鲢、鳙混养和蚌与银鲫混养）和 2 种管理（施肥、投饵兼施肥）模式下养殖水体的浮游生物和初级生产力的围隔实验中也发现了类似的结果。SN、SL、SH3 组浮游藻类细胞密度差异不显著，可能与夏季高水温、各组湖泊中营养盐丰富有关（王瑞等，未发表）。秋季时，SN 组以蓝藻占绝对优势，总的细胞密度也达到全年最大值。相比于 SL 组，SH 组的蓝藻优势更大，SH 组的浮游藻类细胞密度高于 SL 组的浮游藻类细胞密度。SL、SH 两组秋季时均以蓝藻-绿藻-硅藻-隐藻占混合优势，这与秋季调查时养殖湖泊已进行赶鱼，大量养殖的鱼被捕捞的情形相符合。秋季调查时，湖泊中鱼类的数量急剧减少，对捕食压力比较敏感的隐藻、硅藻比例增加。另外，秋季水温的降低，也有利于喜低温的硅藻的生长。冬季时，蓝藻优势 SN 组〉SH 组〉SL 组，浮游藻类细胞密度 SN 组最高，SH 组最低，延续了秋季的情形。

3.3 群落分析

聚类分析的结果与 NMDS 排序分析的结果相近，互相佐证。研究期间，同属于 SR 组的院基寺水库、夏家寺水库和梅店水库的四季样品与其余 3 组湖泊的样品相似性很低。这与 SR 组均为水库，营养盐状况显著不同于其他 3 组湖泊的实际状况相符。除夏季外，SN、SH 两组的相似性较他们与 SL 组的高，可能与他们相近的营养盐浓度有关，这与 SN、SH 两组均以代表着水体处于富营养化状态的平裂藻为优势种的结果相符合。

在亚热带地区内陆未受污染的水体中，浮游植物种类和数量通常春季以喜低温的硅藻和金藻为主，夏季以喜高温的蓝藻和绿藻为主，秋季和冬季浮游植物种类和数量都较少[48]。而受污染比较严重的明珠湖[48]夏、秋两季以蓝藻占绝对优势，且优势种单一，没有发生更替，春、冬两季时，尤其是冬季的硅藻生物量的增加，降低了蓝藻门比例，藻类组成发生了一些改变。在本研究中，SR 组的不同季节的样品之间的相似性要低于 SN、SH 组，可能反映了与季节相关的一些因素对 SR 组浮游植物群落构成的影响较大。SN、SH 组的春、冬季样品之间相似性高，夏、秋季样品之间相似性高，这也可能反映了季节因素的作用。

4 结论

本文研究了不同鱼类养殖强度下长江中游湖泊的浮游植物群落的季节动态，得到了如下初步结论：

(1) 养殖密度高或者曾有过养殖活动的湖泊在一年四季中存在着相对稳定的、优势度比较大的优势种，如 SN 组的平裂藻，SL 组的假鱼腥藻，SH 组的平裂藻、微囊藻和栅藻。SR 组并未出现较为稳定的、优势度较大的优势种，这可能与该组为水库，水面积和水深较大且营养盐较低有关。平裂藻在 SN、SH 两组中均取得较大优势，可能与 SN、SH 组中较高的营养盐浓度有关。SL 组全年优势种与 SN、SH 两组的不同可能是由湖泊形态学特征及鱼类养殖强度的差异等因素共同作用引起的；

(2) 高浓度营养盐导致的蓝藻优势在 SN、SL、SH 组湖泊浮游藻类的总丰度变化中扮演着重要作用，水温、鱼类滤食等因素也发挥着一定的作用；

(3) 群落分析的结果显示 SR 组单独聚为一类，SN 组与 SH 组春、秋、冬 3 个季节时均为一类。

综合看来，鱼类养殖强度以及与季节相关的因素(如水温等)对浮游植物群落的演替具有重要的意义。

参考文献：

[1]崔奕波，李钟杰.长江流域湖泊的渔业资源与环境保护[M].北京：科学出版社，2005： 1-181.

CUI Y B，LI Z J. Fishery resources and conservation of environ¬ment in lakes of the Changjiang River basin[M]. Beijing: Sci¬ence Press，2005: 1-181.

[2]湖北农业信息网.湖北省淡水产品总量连续 20 年位居全国第一[J].农村百事通，2016(9)： 10.

[3] HERBECK L S, UNGER D, WU Y, et al. Effluent, nutrient and organic matter export from shrimp and fish ponds causing eutrophication in coastal and back-reef waters of NE Hainan, tropical China[J]. Continental Shelf Research, 2013 , 57(1): 92-104.

[4] XIE B, QIN J, YANG H, et al. Organic aquaculture in China: a review from a global perspective [J]. Aquaculture, 2013 , s 414-415(11): 243-253.

[5] SOMMER U. The PEG-model of seasonal succession of plank¬tonic events in fresh waters [J] • Archiv Fur Hydrobiologie, 1986, 106(4) : 433-471.

[6] SOMMER U, ADRIAN R，DOMIS L D S, et al. Beyond the plankton ecology group (PEG) model: mechanisms driving plankton succession [J] • Annual Review of Ecology Evolution & Systematics, 2012, 43(1) : 429-448.

[7] BACHMANN R W, JONES B L, FOX D D, et al. Relations : between trophic state indicators and fish in Florida (U. S. A.) lakes [J]. Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences, 1996, 53(4) : 842-855.

[8] HAVENS K E, EAST T L, JOSEPH M, et al. Dynamics of the exotic Daphnia lumholtzii and native macro-zooplankton in a 1 subtropical chain-of-lakes in Florida, U. S. A. [J]. Freshwa- ter Biology, 2010, 45(1) : 21-32.

[9] YANG Y, HUANG X, LIU J. Long-term changes in crustacean i zooplankton and water quality in a shallow, eutrophic Chinese jlake densely stocked with fish [J]. Hydrobiologia, 1998，391(1-3) : 193-201.

[10] HAVENS K E. Zooplankton structure and potential food web in-teractions in the plankton of a subtropical chain-of-lakes [J]. The scientific world journal, 2002, 2： 926-942.

[11] HUNT R J, MATVEEV V F. The effects of nutrients and zoo¬plankton community structure on phytoplankton growth in a sub¬tropical Australian reservoir： an enclosure study[J]. Limnologi- ca, 2005, 35(1) ： 90-101.

[12] IGLESIAS C，MAZZEO N, MEERHOFF M，et al. High preda¬tion is of key importance for dominance of small-bodied zoo¬plankton in warm shallow lakes: evidence from lakes, fish ex- closures and surface sediments [J] • Hydrobiologia, 2011，667(I) ： 133-147.

[13] WANG S, XIE P，WU S, et al. Phytoplankton biomass in rela¬tion to nutrients and zooplankton in thirty subtropical lakes adja¬cent to the Yangtze River, China[J]. Fundamental and Applied Limnology, 2007, 169(1) ： 49-55.

[14] LAZZARO X. A review of planktivorous fishes: Their evolution, feeding behaviors, selectivities，and impacts [J]. Hydrobiolo¬gia, 1987, 146(2) : 97-167.

[15] 周洁，林峰.鲢、鳙的食性及其对藻类的消化利用[J].水生生物学报，1990, 14(2)： 170-175.

ZHOU J, LIN F. The feeding habit of silver carp and bighead and their digestion of algae [J] • Acta Hydrobiologica Sinica， 1987, 14(2): 170-175.

[16] 刘其根，张真.富营养化湖泊中的鲢、鳙控藻问题：争议与共识[门.湖泊科学，2016, 28(3)： 463-475.

LIU Q G, ZHANG Z. Controlling the nuisance algae by silver and bighead carps in eutrophic lakes: disputes and consensus [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(3) : 463-475.

[17] WANG Y, GU X, ZENG Q, et al. Contrasting response of a plankton community to two filter-feeding fish and their feces: An in situ，enclosure experiment [J]. Aquaculture，2016，465 : 330-340.

[18] BURKE J S, BAYNE D R，REA H. Impact of silver and big¬head carps on plankton communities of channel catfish ponds [J]. Aquaculture, 1986, 55(1) ： 59-68.

[19] 唐汇娟，谢平.围隔中不同密度鲢对浮游植物的影响[J].华中农业大学学报，2006, 25(3)： 277-280.

TANG H J，XIE P. Enclosure experiment on the effects of silver carp (Hypophthalmichthys molitrix) density on the phytoplank¬ton [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2006, 25 (3) : 277-280.

[20] 欧阳昊.白鲢和尼罗罗非鱼混养养殖对热带水库富营养化 及浮游植物群落结构影响——大型围隔实验研究[D].暨 南大学，2007.

OU Y H. Effect of a mixed culture of silver carp (Hypophthal-michthys molitrtix) and Nile tilapia (Oreochromis nilotica) on phytoplankton community and eutrophication in a tropical reser¬voir： a large enclosure experiment[D]. Jinan University, 2007.

[21] 赵帅营.营养盐加富和鲢对南亚热带贫——中营养型水库浮游生物群落的影响：大型围隔实验[D].暨南大学， 2009.

ZHAO S Y. Effect of nutrient enrichment and a filter-feeding fish (silver carp， Hypophthalmichthys molitrix) on plankton community in a subtropical oligo-mesotrophic reservoir, South China： a large-scale enclosure experiment[D]. Jinan Universi¬ty, 2009.

[22] 杨建雷.淡水鱼混养池塘链鱼(molitrix) 的滤食作用对浮游植物群落结构的影响[D].中国海洋大 学，2011.

YANG J L. Effects of filter-feeding silver carp (Hypophthal¬michthys molitrix) on the phytoplankton community structure in the polyculture poftds of freshwater fish [D] . Ocean University of China, 2011.

[23] 胡征宇.湖北的绿球藻目[D].中国科学院水生生物研究 所，1991.

HU Z Y. On the order chlorococcales of Hubei province [D]. Institute of Hydrobiology, Chiense Academy of Sciences, 1991.

[24] 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.

HU H J，WEI Y X. The freshwater algae of China systemat-ics, taxonomy and ecology [M]. Beijing: Science Press, 2006.

[25] 胡鸿钧.水华蓝藻生物学[M].北京：科学出版社.2011. HU H J. The biology of water-blooms blue-green algae [M] • Beijing： Science Press, 2011.

[26] 周凤霞，陈剑虹.淡水微型生物与底栖动物图谱(第 2 版) [M].北京：化学工业出版社.2011.

ZHOU F X, CHEN J X. Images of freshwater microbiology and macrobenthos (2nd edition) [M]. Beijing： Chemical Industry Press. 2011.

[27] 朱梦灵.丝状蓝藻假鱼腥藻和泽丝藻的分类学研究及分子 监测[D].中国科学院水生生物研究所，2012.

ZHU M L. Poly phasic studies on the taxonomy of filamentous cyanobacteria Pseudanabaena and Limnothrix and their ecologi¬cal application [D] • Institute of Hydrobiology, Chiense Acade¬my of Sciences, 2012.

[28] 章宗涉，黄祥飞.淡水浮游生物研究方法[M].北京：科学 出版社.1991.

ZHANG Z S, HUANG X F. Research method of freshwater plankton[M]. Beijing： Science Press, 1991.

[29] 张婷，李林，宋立荣.熊河水库浮游植物群落结构的 周年变化[J].生态学报，2009, 29(6)： 2971-2979.

ZHANG T，LI L, SONG L R. Annual dynamics of phytoplank¬ton abundance and community structure in the Xionghe reservoir [J]. Acta Ecologies Sincia, 2009, 29(6) : 2971-2979.

[30] 孙军，刘东艳.多样性指数在海洋浮游植物研究中的应用[JL 海洋学报，2004, 26(1)： 62-75.

SUN J, LIU D. The application of diversity indices in marine phytoplankton studies[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 26 (1) ： 62-75.

[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.

QIN J J, WANG Y. Application and evaluation of phytoplankton diversity indexes [J]. Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition) , 2014, 32(4) : 502-505.

[32] 张景平，黄小平，江志坚，等.珠江口海域污染的水质综合 污染指数和生物多样性指数评价[门.热带海洋学报， 2010, 29(1) ： 9-76.

ZHANG J P, HUANG X P, JIANG Z J, et al. Assessment of the Pearl River Estuary pollution by water comprehensive pollu¬tion index and biodiversity index [J]. Journal of Tropical Ocea¬nography ,2010, 29(1) : 69-76.

[33] 吴波，陈德辉，吴琼，等.黄浦江浮游植物群落结构及 其对水环境的指示作用U].植物科学学报，2007, 25(5)： 467-472.

WU B, CHEN D H, WU Q, et al. Study on the structure of phytoplankton community and water quality monitoring in Huan-gpu river[J]. Plant Science Journal, 2007 , 25(5) : 467-472.

[34] SALMASO N. Seasonal variation in the composition and rate of change of the phytoplankton community in a deep subalpine lake (Lake Garda, Northern Italy) . an application of nonmetric mul-tidimensional scaling and cluster analysis [J]. Hydrobiologia, 1996, 337(1-3) : 49-68.

[35] CLARKE K R, WARWICk R M. Changes in marine communi¬ties： an approach to statistical analysis and interpretation [M]. Plymouth, UK： PRIMER-E Ltd, 2001.

[36] HAN B P, ARMENGOL J, GARCIA J C, et al. The thermal structure of Sau Reservoir (Spain NE) : a simulation approach [J]. Ecological Modelling, 2000, 125(2-3) : 109-122.

[37] NASELLI-FLORES L. Phytoplankton assemblages in twenty-one Sicilian reservoirs: Relationship between species composition and environmental factors [J]. Hydrobiologia, 2000, 424： 1-11.

[38] 刘长发,綦志仁,何洁,等.环境友好的水产养殖业—— 零污水排放循环水产养殖系统U].大连水产学院笋报，2002, 17(3): 220-226.

LIU C F, QI Z R, HE J, et al. Environmental friendship aqua¬culture zero discharge integrated recirculating aquaculturesystems [J]. Journal of Dalian Fisheries university, 2002, 17 (3) : 220-226.

[39] BORGES P A F, TRAIN S, DIAS J D, et al. Effects of fish farming on plankton structure in a Brazilian tropical reservoir [J]. Hydrobiologia, 2010, 649(1)： 279-291.

[40] BARTOZEK E C, BUENO N C, RODRIGUES L C. Influence of fish farming in net cages on phytoplankton structure: a case study in a subtropical Brazilian reservoir [J]. Brazilian Journal of Biology, 2014, 74(1) : 145-155.

[41] 张俊芳，冯佳，谢树莲，等.山西宁武亚高山湖群浮游植 物群落结构特征[J].湖泊科学，2012, 24(1)： 117-122. ZHANG J F, FENG J, XIE S L, et al. Characteristics of phyto¬plankton community structure in Ningwu subalpine lakes, Shanxi Province[J] . Journal of Lake Sciences, 2012, 24(1): 117-122.

[42] 邱小琮，赵红雪.宁夏沙湖浮游植物群落结构及多样性研究[J].水生态学杂志，2011，32(1)： 20-26.

QIU X Z, ZHAO H X. Community structure and biodiversity of phytoplankton in Shahu lake, Ningxia [J]. Journal of Hydro-ecology ,2011，32(1) : 20-26.

[43] 岑竞仪，李扬，吕颂辉，等.流溪河和湛江河从化段浮游 植物群落结构研究 U].植物科学学报，2010, 28(5)： 561-567.

CEN J Y, LI Y, LU S H, et si. Structural characteristics of phytoplankton in Liuxi and Bajiang River, China[J]. Plant Sci¬ence Journal, 2010, 28(5) : 561-567.

[44] 金相灿，屠清瑛.湖泊富营养化调查规范(第二版)[M]. 北京：中国环境科学出版社，1990.

JIN X C, TU Q Y. The standard methods in lake eutrophication investigation (2nd edition) [M]. Beijing： China Environmental Science Press, 1990.

[45] 胡初，熊江霞，韩博平.具有短水力滞留的小型富营养 化水库浮游植物群落结构与动态 U].生态环境学报， 2008, 17(4) : 1319-1326.

HU R，XIONG J X, HAN B P. Structure and dynamics of phy-toplankton assemblages in a small eutrophic reservoir with a short residence time [J]. Ecology and Environment, 2008, 17 (4) : 1319-1326.

[46] 胡玉婷，江河，卢文轩，等.安徽太平湖浮游生物调查与 鲢鳙鱼产力评估[J].安徽农业大学学报，2017, 44(2)： 234-234.

HU Y T, JIANG H, LU W X, et al. Investigation on plankton and production estimation of silver carp and bighead carp in Taiping Lake, Anhui Province[J]. Journal of Anhui Agricultur¬al University, 2017, 44(2) : 234-241.

[47] KANGRO K, LAUGASTE R, NOGES P, et al. Long-tem changes and seasonal development of phytoplankton in a strongl stratified, hypertrophic lake [J]. Hydrobiologia, 2005 , 54(I) : 91-103.

[48] 陈立婧，吴竹臣，胡忠军，等.上海崇明岛明珠湖浮游植斗 群落结构[J].应用生态学报，2011，22(6)： 1599-1605. CHEN L J, WU Z C, HU Z J, et al. Phytoplankton communi structure in Mingzhu Lake of Chongming Island, Shanghai [J Chinese Journal of Applied Ecology, 2011，22(6): 1599 1605.

[49] 顾谢军，徐东炯，蔡焕兴，等.洮涌水系湖库富营养化生 风险的特点与比较[J].环境监控与预警，2011, 3(3 13-17.

GU X J, XU D J, CAI H X，et al. Feature analysis and c(parison on ecological risk of eutrophication in lakes and

reser in Taoge river[J]. Environmental Monitoring and Forewami 2011，3(3) : 13-17.

[50] NIXDORF B, MISCHKE U，RUCKER J. Phytoplankton ass blages and steady state in deep and shallow eutrophic lakes approach to differentiate the habitat properties of Oscillator[J]. Hydrobiologia, 2003, 502(1-3) : 111-121.

[51]林秋奇，韩博平.热带直流型水库蓝藻季节变化特征丨热带亚热带植物学报，2007, 15(2)： 152-159.

LIN Q Q, HAN B P. Seasonal fluctuation of cyanobacteria pop-ulation in tropical through-flowing reservoirs [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2007, 15(2) : 152-159.

[52] 夏品华，刘燕，薛飞，等.贵州百花湖水库浮游植物群 落结构与季节变化 U].地球与环境，2012, 40(2) : 179- 187.

XIA P H, LIU Y, XUE F, et al. Dynamics and structure of phytoplankton community in the Baihua reservoir, Guizhou [J]. Earth and Environment, 2012, 40(2) : 179-187.

[53] 林秋奇，雷腊梅，韩博平.南亚热带不同营养水平水库的 蓝藻组成与动态[J].生态学杂志，2007, 26(7) : 1027- 1033.

LIN Q Q, LEI L M, HAN B P. Cyanophyta in south subtropical reservoirs with different trophic levels[J]. Chinese Journal of E- cology, 2007, 26(7) : 1027-1033.

[54] OLIVER R L, GRANF G G. Freshwater Blooms [M]. In： Whitton B A, Potts M. The ecology of cyanobacteria. The Neth¬erlands :Kluwer Academic Publishers, 2002，149-194.

[55] 王勇.武汉大东湖浮游植物群落特征及水质评价[D].中 国科学院水生生物研究所，2011.

WANG Y. Phytoplankton assemblage characteristics and water quality assessment of lake Donghu district[D]. Institute of Hy-drobiology ,Chiense Academy of Sciences，2011.

[56] 路学堂.东平湖浮游植物群落结构与驱动因子及蓝藻水华 可能性研究[D].山东大学，2013.

LU X T. The research on phytoplankton community, driving en-vironmental factors and the possibility of cyanobacterial bloom in Dongping Lake, China[D]. Shandong University, 2013.

[57] HAVENS K E, PHLIPS E J, CICHRA M F, et al. Light avail¬ability as a possible regulator of cyanobacteria species composi¬tion in a shallow subtropical lake [J]. Freshwater Biology, 1998, 39: 547-556.

[58] VILLENA M J，ROMO S. Phytoplankton changes in a shallow Mediterranean lake (Albufera of Valencia, Spain) after sewage diversion [J]. Hydrobiologia, 2003, 506/509： 281-287.

[59] 朱生博，王岩，王小冬，等.不同放养和管理模式下三 角帆蚌养殖水体中的浮游生物和初级生产力[J].生态学 杂志，2008, 27(3) : 401-407.

ZHU S B, WANG Y, WANG X D, et al. Phytoplankton com¬munity and primary productivity in waters for culturing freshwa¬ter

pearl mussel (Hyriopsis cumingii) under different stockings and management models [J] • Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(3) : 401-407.