DOI:10.15928/j.1674-3075.20190515012

白洋淀不同沉水植物盖度下浮游植物群落结构及变化

张军旺[1,2],谢 骏[1,3],李志斐[1,3],张晓可[4],王广军[1,3],张 凯[1,3],刘 阳[1,2],肖国华[5]

(1.中国水产科学研究院珠江水产研究所,农业部热带亚热带水产资源利用与养殖重点实验室,广州 510380;
2.上海海洋大学,水产与生命学院,上海 201306;
3.广东省水产养殖污染修复生态工程研究中心,广州 510380;
4.安庆师范大学水生生物保护与水生态修复安徽省高校工程技术研究中心,安庆 246133;
5.河北省海洋与水产科学研究院,秦皇岛 066200)

摘要:为研究不同沉水植物盖度下浮游植物群落结构及变化规律,为水域生态修复提供科学依据,在白洋淀选取了4个盖度水平区域,分别为25%、50%、75%和90%(C-25、C-50、C-75、C-90),对照区域(C-0)结合水体理化参数和浮游植物群落结构特征,评价出沉水植物的最佳盖度。结果表明,沉水植物组均可有效降低水体总氮(TN)、总磷(TP)、溶解性固体总量(TDS)和电导率(SPC),而C-50组的TN和TP浓度最低。对浮游植物群落结构分析发现1)沉水植物组浮游植物种类数高于对照组,各组绿藻门比例最高且均在50%以上;2)C-50组蓝藻门优势种最少且比例显著低于其他组($P<0.05$);3)浮游植物密度和生物量随沉水植物盖度的增加而降低,且占比最大的分别是蓝藻门和绿藻门;4)Margalef指数随盖度增加表现出先上升后降低的趋势;而Shannon-Weiner指数和Pielou指数随盖度的增加而增大;5)RDA表明,C-90、C-75和C-0组的浮游植物群落主要受TDS、SPC、pH、叶绿素a、高锰酸钾指数和透明度等环境因子的影响;C-50和C-25组浮游植物群落受环境因子的影响较小,说明水生态系统较稳定且受环境的影响小。鉴于盖度为50%时,TDS、SPC、TN和TP浓度最低;蓝藻门比例和优势种较低,Margalef指数最高,在水生态保护或修复时,建议沉水植物盖度以50%为宜。

关键词:盖度;沉水植物;白洋淀;浮游植物群落结构

中图分类号:X820.6 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2021)01-0075-09

沉水植物和浮游植物都是水生态系统中主要的初级生产者,两者都能反映湖泊水体营养化的现状与变化。在水域生态系统中,沉水植物与浮游植物之间的相互作用较复杂,主要包括对营养物质、空间的竞争和分泌化感物质等。陈德辉等(2004)发现篦齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)对栅藻(*Scenedesmus* Meyen)和微囊藻(*Microcystis*)有一定的化感作用;Nakai等(2000)研究发现穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum* L.)通过释放出化感物质抑制微囊藻的生长。沉水植物对浮游植物的化感作用抑制了藻类的生长,防止了草型清水湖泊向藻型浊水湖泊的演替(杨旻等,2007)。在浅水湖泊中,水体富营养化抑制沉水植物的生长,这将会导致藻类的暴发和水生植被的退化(Hough, 1989;邓文丽等,2013)。然而,沉水植物覆盖面积过大,沉水植物的腐烂死亡也会引起水体富营养化,将导致草型湖泊向沼泽化演变(张圣照,1999)。将沉水植物盖度控制在一定范围内,既有利于营养物质的合理利用,又有助于水生态系统的稳定循环,最终使得沉水植物和浮游植物的生长处于平衡状态。

有学者在室内研究了不同盖度的沉水植物金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)对富营养化水体修复的模拟实验,综合比较水体理化因子的变化,得出20%是金鱼藻最佳的盖度(Dai et al,2012)。同时也有研究表明,长梗苦草(*Vallisneria longipedunculata*)的盖度较大(80%和100%)时,浮游植物生物多样性较高,全年的平均值分别为2.0和2.1;当沉水植物盖度为40%时,浮游植物现存量的波动最小,且生物多样性保持平稳状态(宋芳芳,2012)。这些研究表明,不同种类的沉水植物在富营养化水体修复中的最适盖度也不同。然而,这些研究结果基本都是通过室内模拟实验得出,是否适用自然湖泊仍需进一步验证。

白洋淀是海河流域最大的湖泊,水资源丰富,具

收稿日期:2019-05-15

基金项目:农业农村部财政专项(2130106-ZJBYD)。

作者简介:张军旺,1993年生,硕士研究生,主要研究方向为湖泊渔业生态。E-mail:zjwj0922@163.com

通信作者:王广军,1973年生,研究员,主要从事水产动物健康养殖研究。E-mail: wgj5810@163.com

有广阔的水面和沼泽湿地，堪称“华北之肾”。白洋淀的修复和保护对华北地区生态稳定至关重要，关系到“千年大计，国家大事”的雄安新区建设。白洋淀主要由143个淀区组成，不同淀区沉水植物盖度差异较大，目前大部分淀区沉水植物盖度较低。位于中南部的鲫鲦淀东西长约1.2 km、南北宽约1.1 km，水深1～3 m，仅有4个水口与外界连接，其沉水植物盖度在夏季最高达到90%左右，沉水植物的过度生长影响了船只的正常行驶，在腐烂期还对水体造成二次污染。本研究在鲫鲦淀水域设置了4个沉水植物盖度区域和1个无沉水植物对照组区域，分析沉水植物不同盖度下白洋淀浮游植物群落结构及变化规律，结合水体理化参数和浮游植物群落结构特征，评价出白洋淀沉水植物的最佳盖度，为白洋淀的生态系统修复提供理论基础。

1 材料与方法

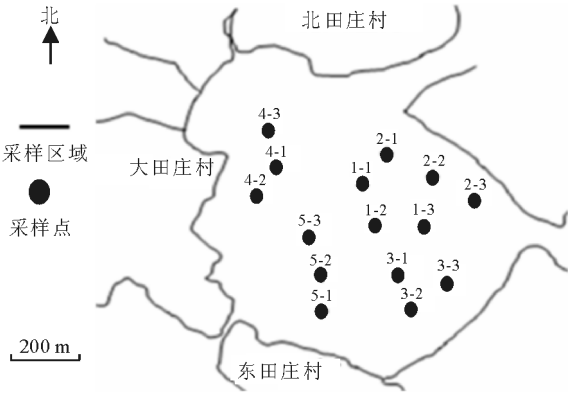
1.1 采样点设置

将1根5 m长的PVC管平放在湖面作为参照物，使用改造过的多功能蓝牙连接可遥控的自拍杆对湖面5 m×5 m的区域进行高空拍照；选取较完整的图片将其分隔为0.5 m×0.5 m的100个小格，将沉水植物所占每个小格的面积累加，即可估算出该区域沉水植物的盖度。参照《湖泊富营养化调查规范》和《湖泊生态调查观测与分析》的方法，于2018年7月在淀区设置4个沉水植物盖度区域(C-25、C-50、C-75、C-90)，盖度分别为25%、50%、75%、90%，对照区域(C-0)无沉水植物。盖度区、对照区面积分别为0.33、0.13、0.27、0.20和0.40 km^2，每个盖度组合对照组均设置3个重复样点，共15个采样点，采集浮游植物。采样点设置如图1。

1.2 样品采集与处理

环境因子分析。用YSI多功能水质分析仪(ProPlus)现场测定水体的温度(Temp)、溶解氧(DO)、pH、电导率(SPC)和溶解性固体总量(TDS)等指标；水深(WD)和透明度(SD)用塞氏盘法当场测定。每个采样点均取混合水样，带回实验室按照标准方法(国家环境保护总局，水和废水监测分析方法编委会，2002)测定水体中的总氮(TN)、总磷(TP)等指标。

浮游植物采集。定性样品采集：用25#浮游生物网(孔径为64 μm)在水面下做“∞”形缓慢拖动2 min，取过滤浓缩后水样加鲁哥氏液固定。定量样品采集：用有机玻璃采水器采集1 L水样倒入有刻度的聚乙烯瓶中，加入鲁哥氏液固定并定容，静置48 h后，用虹吸管吸取上清液，并把沉淀物倒入已标定容积(30 mL)的小塑料瓶中，于实验室中采用常规方法在显微镜下对所有浮游植物进行种类鉴定(胡鸿钧和魏印心，2006)。



注：1-1～1-3代表沉水植物盖度90%；2-1～2-3代表沉水植物盖度75%；3-1～3-3代表沉水植物盖度50%；4-1～4-3代表沉水植物盖度25%；5-1～5-3代表对照组。

图1 白洋淀浮游植物采样点分布

Note: 1-1 - 1-3 represent 90% coverage of submerged plants; 2-1- 2-3 represent 75% coverage of submerged plants; 3-1 - 3-3 represents 50% coverage of submerged plants; 4-1 - 4-3 represent 25% coverage of submerged plants; 5-1 - 5-3 represent the control group.

Fig.1 Location of the phytoplankton sampling sites in Baiyangdian Lake

1.3 数据分析

根据浮游植物不同物种的出现频率(f_i)和个体数量(N_i)与总数量(N)的比例来计算优势度(Y)，公式为：

$$Y=(N_i/N)f_i \quad ①$$

当$Y\geqslant 0.02$时，确定为优势种(刘长东，2016)。

在SPSS18.0软件中运用单因素方差分析(One-way ANOVA)来检验5个不同盖度沉水植物下白洋淀环境因子和浮游植物密度、生物量之间差异显著性。Shannon-Weiner多样性指数(H)、Margalef物种丰富度指数(D)和Pielou均匀度指数(J)的计算公式分别为：

$$H=-\Sigma(P_i)(\ln P_i) \quad ②$$

公式中P_i为物种i个体数所占的比例；

$$D=(S-1)/\ln N \quad ③$$

公式中N为样品中所有物种的总个体数，S为样品中种类总数；

$$J=H/\ln S \quad ④$$

采用Canoco 5.0软件对浮游植物与环境因子

之间的关系进行冗余分析(Redundancy analysis，RDA)。据其第一轴长度确定分析类型(>4 用 CCA 分析，<3 用 RDA 分析，3～4 二者均可)。

2　结果结果与分析

2.1　水体理化指标

水温和溶解氧的最高值与最低值均出现在 C-0 组和 C-90 组；C-75 组和 C-50 组的溶解氧与其他 3 组差异显著($P<0.05$)；C-75 组的 pH 显著高于其他组($P<0.05$)，其他组之间差异不显著($P>0.05$)；除 C-25 组与 C-0 组的 TDS 差异不显著($P>0.05$)外，其他组之间差异显著($P<0.05$)，最低值和最高值分别为 C-90 组的 858.0 mg/L 和 C-75 组的 1040.0 mg/L；SPC 的差异显著性与 TDS 一致；C-90 和 C-50 组的水深与其他 3 组差异显著，水深最小值和最大值分别为 C-90 组的 2.30 m 和 C-75 组的 2.53 m；C-75 组的透明度最大值为 1.64 m 且明显高于其他组($P<0.05$)，平均最低值为 C-0 组的 1.12 m；C-0 组的 TN 显著高于 C-90 和 C-50 组($P>0.05$)；C-0 组和 C-25 组的 TP 显著高于 C-50 和 C-90 组($P<0.05$)。具体数据见见表 1。

2.2　不同沉水植物盖度对白洋淀浮游植物的影响

2.2.1　*浮游植物种类组成*　C-90 组和 C-0 组浮游植物各 5 门，其他组均为 6 门。C-90、C-75、C-50、C-25 和 C-0 组的浮游植物种类分别为 26、23、29、33 和 25 种，绿藻门比例最高且均在 50%以上；C-50 组与 C-0 组蓝藻门比例差异显著($P<0.05$)，与其他 3 组差异不显著($P>0.05$)；C-0 组硅藻门比例显著低于其他组($P<0.05$)，最大值为 C-25 组的 15.21%，其次是 C-50 组的 13.17%。绿藻门、隐藻门、裸藻门和甲藻门在各组之间的比例差异不显著($P>0.05$)。各组浮游植物种类组成见表 2。

表 1　不同沉水植物盖度下白洋淀水体的理化指标

Tab.1　Physicochemical water body indicators with different submerged macrophyte coverages in Baiyangdian Lake

参数	C-90	C-75	C-50	C-25	C-0
Temp/℃	30.6±0.06^{d}	30.9±0.06^{d}	31.3±0.17^{c}	31.8±0.15^{b}	32.3±0.32^{a}
DO/mg·L^{-1}	5.58±0.83^{c}	8.48±0.24^{b}	8.61±0.96^{b}	10.00±0.66^{a}	10.38±0.85^{a}
pH	9.00±0.19^{b}	9.57±0.01^{a}	8.88±0.11^{b}	9.02±0.03^{b}	9.03±0.03^{b}
TDS/mg·L^{-1}	884.00±6.50^{c}	1035.67±7.51^{a}	866.67±9.93^{d}	916.17±13.60^{b}	927.17±3.62^{b}
SPC/mS·cm^{-1}	1357.33±5.86^{c}	1592.67±13.58^{a}	1329.67±14.57^{d}	1414.33±21.96^{b}	1426.33±4.51^{b}
WD/m	2.32±0.03^{b}	2.45±0.07^{a}	2.35±0.05^{b}	2.50±0.03^{a}	2.49±0.01^{a}
SD/m	1.38±0.20^{b}	1.57±0.09^{a}	1.31±0.02^{bc}	1.13±0.04^{cd}	1.12±0.03^{d}
TN/mg·L^{-1}	1.03±0.05^{b}	1.07±0.03^{ab}	1.05±0.07^{b}	1.10±0.02^{ab}	1.15±0.05^{a}
TP/mg·L^{-1}	0.028±0.006^{c}	0.034±0.006^{bc}	0.027±0.004^{c}	0.044±0.005^{ab}	0.051±0.006^{a}

注：同一参数中不同字母表示显著性差异($P<0.05$)。C-90、C-75、C-50、C-25 分别代表盖度 90%、75%、50%、25%，C-0 代表对照组。

Note: different superscripts on the same parameter indicate significant differences ($P<0.05$). C-90, C-75, C-50, C-25 denote coverage of 90%, 75%, 50%, 25%, respectively, and C-0 denotes the control group.

表 2　不同沉水植物盖度下白洋淀浮游植物各门种数及比例

Tab.2　Species number and proportion of each phytoplankton phyla in Baiyangdian Lake with different submerged macrophyte coverages

门类	C-90		C-75		C-50		C-25		C-0	
	种类	比例/%	种类	比例/%	种类	比例/%	种类	比例/%	种类	比例/%
蓝藻门	7	26.56±3.26^{ab}	6	27.74±4.66^{ab}	6	20.07±2.55^{b}	8	25.67±1.78^{ab}	8	31.50±1.23^{a}
绿藻门	14	52.94±3.94	11	52.38±2.38	16	58.44±3.36	17	51.85±1.85	13	51.44±1.76
硅藻门	3	10.96±1.87^{bc}	2	9.29±0.50^{bc}	4	13.17±1.49^{ab}	5	15.21±0.99^{a}	2	7.91±0.27^{c}
隐藻门	1	4.01±0.54	1	2.98±1.50	1	4.73±1.09	1	3.08±0.16	1	3.96±0.14
裸藻门	0	0	1	1.67±0.32	1	1.15±0.47	1	2.04±1.03	0	0
甲藻门	1	5.53±1.84	2	5.95±2.21	1	2.43±1.22	1	2.15±1.06	1	5.19±1.11

注：同一参数中不同字母表示显著性差异($P<0.05$)。C-90、C-75、C-50、C-25 分别代表盖度 90%、75%、50%、25%，C-0 代表对照组。

Note: different superscripts on the same parameter indicate significant differences ($P<0.05$). C-90, C-75, C-50, C-25 denote coverage of 90%, 75%, 50%, 25%, respectively, and C-0 denotes the control group.

2.2.2　*浮游植物优势种*　C-90 组优势种有蓝藻门的优美平裂藻(*Merismopedia elegans*)、银灰平裂藻(*Merismopedia glauca*)、泽丝藻(*Limnothrix* sp.)，绿藻门的四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)、多形丝藻(*Ulothrix variabilis*)、色球藻(*Chroococcus* sp.)、胶网藻(*Dictyosphaerium* sp.)，

硅藻门的小环藻(*Cyclotella* sp.)。C-75组优势种有蓝藻门的优美平裂藻、鱼腥藻(*Anabaena* sp.)、中华尖头藻(*Raphidiopsis sinensia*)、泽丝藻;绿藻门的双对栅藻(*Scenedesmus bijuga*)、转板藻(*Mougeotia* sp.)、色球藻、具角鼓藻(*Cosmarium angulosum*)、顶锥十字藻(*Crucigenia quadrata*),硅藻门的小环藻。C-50组优势种有蓝藻门的优美平裂藻、泽丝藻;绿藻门的双对栅藻(*Scenedesmus bijuga*)、色球藻、浮球藻(*Planktosphaeria gelotinoca*)、胶网藻,硅藻门的小环藻和尖针杆藻(*Synedra acus*)。C-25组优势种有蓝藻门的银灰平裂藻、优美平裂藻、泽丝藻,硅藻门的小环藻和尖针杆藻。C-0组优势种有蓝藻门的泽丝藻,硅藻门的小环藻。各组浮游植物优势种及优势度见表3。

表3 不同沉水植物盖度下白洋淀浮游植物优势种的优势度

Tab.3 Dominant phytoplankton species and the corresponding dominance of waters with different submerged macrophyte coverages

优势种	代号	优势度				
		C-90	C-75	C-50	C-25	C-0
蓝藻门 Chlorophyta						
银灰平裂藻 *Merismopedia glauca*	*s*1	0.049			0.121	
优美平裂藻 *Merismopedia elegans*	*s*2	0.119	0.038	0.296	0.260	
泽丝藻 *Limnothrix* sp.	*s*3	0.111	0.127	0.113	0.102	0.042
鱼腥藻 *Anabaena* sp.	*s*4		0.035			
中华尖头藻 *Raphidiopsis sinensia*	*s*5		0.117			
绿藻门 Chlorophyta						
四尾栅藻 *Scenedesmus quadricauda*	*s*6	0.020				
多形丝藻 *Ulothrix variabilis*	*s*7	0.032				
色球藻 *Chroococcus* sp.	*s*8	0.106	0.139	0.047	0.040	
胶网藻 *Dictyosphaerium* sp.	*s*9	0.026		0.025	0.105	
浮球藻 *Planktosphaeria gelotinoca*	*s*10			0.025		
双对栅藻 *Scenedesmus bijuga*	*s*11		0.024	0.064		
转板藻 *Mougeotia* sp.	*s*12		0.046			
具角鼓藻 *Cosmarium angulosum*	*s*13		0.032			
顶锥十字藻 *Crucigenia quadrata*	*s*14		0.136		0.061	
硅藻门 Bacillariophyta						
小环藻 *Cyclotella* sp.	*s*15	0.086	0.086	0.121	0.085	0.023
尖针杆藻 *Synedra acus*	*s*16			0.05	0.047	

2.2.3 *浮游植物密度和生物量* 不同沉水植物盖度区域白洋淀浮游植物密度和生物量见图2。浮游植物密度随着沉水植物盖度的增加而减小,C-0和C-25组密度显著高于其他组($P<0.01$),其余3组间密度差异不显著($P>0.01$)。各处理组密度主要由绿藻门、蓝藻门和硅藻门组成,最高和最低密度分别为C-0组的1859.18×10^4个/L和C-75的399.75×10^4个/L。浮游植物生物量随着沉水植物盖度的增加而减少,C-0组和C-25组浮游植物生物量显著高于C-90和C-75组的($P<0.05$),C-50组与其他组之间差异均不显著($P>0.05$)。各组生物量主要来源于绿藻门和硅藻门,生物量最高为C-0组的10.55 mg/L、最低为C-75组的3.09 mg/L。

蓝藻门和绿藻门的密度随沉水植物盖度的增加而减小,两者的密度在各组中几乎相等,最高值分别为C-0组的978.23×10^4、599.79×10^4个/L,最低值分别为C-75组的158.32×10^4、186.30×10^4个/L。硅藻门密度的最高值为C-0组的260.41×10^4个/L,最低值为C-75组的37.74×10^4个/L。各组裸藻门、甲藻门和隐藻门密度在0~52.59×10^4个/L。各组生物量最高的为绿藻门(1.85~5.45 mg/L),其次为硅藻门;蓝藻门生物量随沉水植物盖度的增加而减少,最高值为C-0组的0.91 mg/L,最低值为C-90组的0.32 mg/L;各组裸藻门、甲藻门和隐藻门的生物量均较低。

2.2.4 *浮游植物多样性* 不同沉水植物盖度区域浮游植物多样性指数见图3。各组的Margalef多样性指数在1.86~2.56,最小值出现在C-0组,最大值出现在C-50组。Shannon-Weiner多样性指数差异较小,最大值为C-0组的2.82,最小值为C-25组的2.61。Pielou均匀度指数最小值为C-25组的0.76,最大值为C-75组的0.91。

2.3 不同沉水植物盖度下浮游植物与水环境因子的关系

16种优势藻DCA分析结果显示,排序轴梯度长度(LGA)最大值为2.3,故选择RDA进行约束

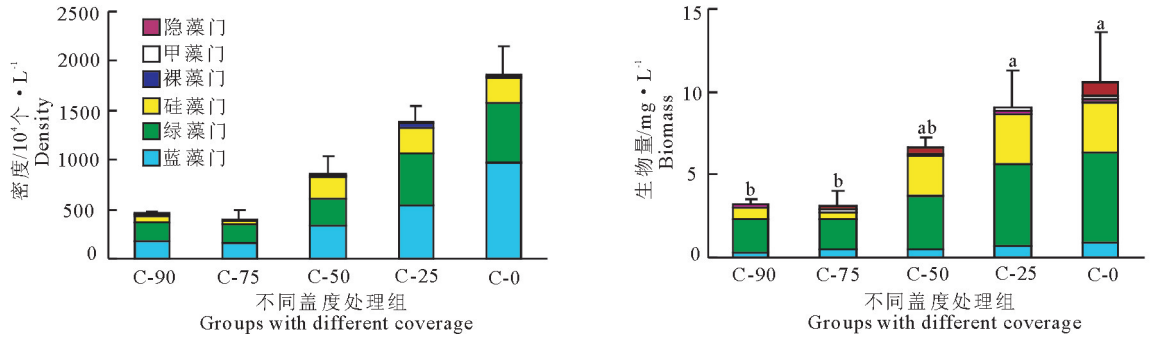


图 2　不同沉水植物盖度下白洋淀浮游植物密度和生物量的变化

Fig.2　Variation of phytoplankton density and biomass of water area under different submerged macrophyte coverages

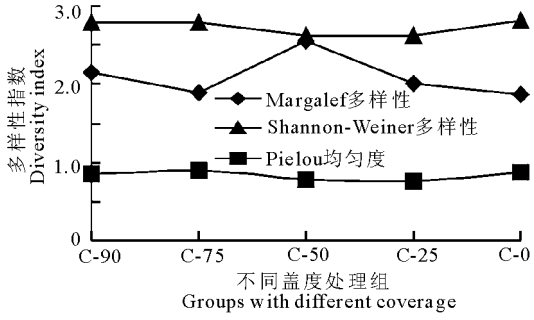


图 3　不同沉水植物盖度下浮游植物多样性指数变化

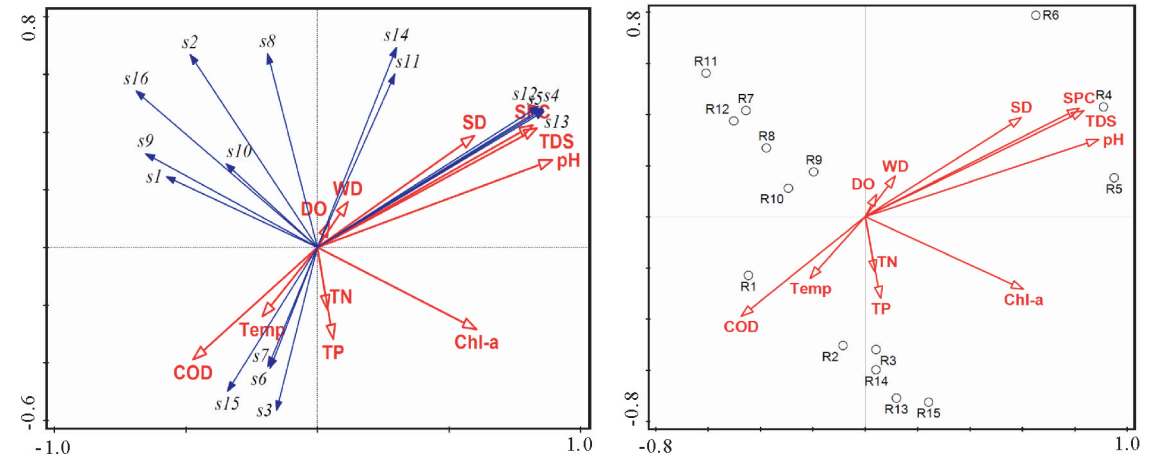
Fig.3　Variation of phytoplankton diversity indices of water area under different submerged macrophyte coverages

性排序。RDA 分析结果显示，前 3 轴特征值分别为 0.320、0.268 和 0.154，分别解释了 31.98%、26.77% 和 15.37%的物种-环境关系变量，环境-物种关系的累积比率为 85.79%，说明排序图可较好地反映环境因子和浮游植物群落结构指标之间的关系。RDA 分析结果表明 TDS、SPC、pH、Chl-a、COD_{Mn} 和 SD 是影响浮游植物分布的主要环境因子。

采样点与环境因子 RDA 分析（图 4）表明，不同沉水植物盖度下影响浮游植物群落结构的环境因子不同。C-90 组浮游植物群落主要受 COD_{Mn} 和 Temp 影响；C-75 组浮游植物群落主要受 TDS、SPC、pH 和透明度（SD）的影响；C-50 和 C-25 组采样点的生态环境较好，该采样点的浮游植物种类数显著高于其他组，水体透明度和溶解氧含量较高，TN、TP 和 Chl-a 含量则相对较低，且与浮游植物群落结构呈负相关关系；C-0 组浮游植物群落结构主要受 Chl-a、TP 和 TN 含量的影响。

3　讨论

在浅水湖泊中，沉水植物的生物量与水体透明度呈正相关，水草生物量高，透明度也高（章宗涉，1998）。本试验中，沉水植物的盖度增加到 75%时，透明度达到最大值 1.57 m，而 C-90 组的则降低到



注：R1～R3 代表 C-90 组，R4～R6 代表 C-75 组，R7～R9 代表 C-50 组，R10～R12 代表 C-25 组，R13～R15 代表 C-0 组；$s1$～$s16$ 分别代表 16 个浮游植物优势物种，具体见表 3。

图 4　采样点与环境因子及优势藻类与水环境因子之间的 RDA 分析

Note: R1－R3, R4－R6, R7－R9, R10－R12, R13－R15 denote C-90, C-75, C-50, C-25 and C-0 group, respectively. $s1$－$s16$ denote the 16 dominant phytoplankton species, as shown in table 3.

Fig.4　RDA analysis between sampling sites and environmental factors, and between species and environmental factors

1.38 m,但均高于其他3组(C-0、C-25、C-50),说明盖度与透明度不一定呈正相关关系,可能原因是过高盖度的沉水植物冠层堆积在湖面,在高温下发黄腐烂分解,破坏了水质。因此沉水植物盖度也是有极限的,将盖度保持在一定范围既有利于水生态的稳定,又能节省劳动力清理腐烂的水草。本研究中,C-50组pH值最小,对应的总磷浓度也较低;而C-75组pH值最大(9.57),其总磷浓度却不是最高,TP最大值为C-0组的0.051 mg/L,这与Seitzinger等(1991)研究结果不一致。导致pH升高、TP浓度未升高的原因可能是较高盖度的沉水植物吸收了水体中的磷元素(Declerck et al,2005),而C-0组几乎不存在沉水植物,从而水体中TP浓度最高。C-0组TN和TP浓度显著高于其他组的主要原因是,大量沉水植物消失,在风浪和鱼类捕食活动的搅动下,裸露的湖底沉积物中营养物质释放到水体(Scheffer et al,1993)。溶解氧浓度随着沉水植物盖度的增加而降低,但均不会影响水生动物的生存,这可能是沉水植物盖度过高造成水下光合作用减少(Scheffer,2001),导致沉水植物盖度较低的C-0和C-25组的溶解氧高于其他组。Sagrario等(2005)研究发现,总氮浓度的升高将影响沉水植物的种类和分布。本研究中C-0组的总氮浓度显著高于其他组($P<0.05$),最低值出现在C-50组,说明随着沉水植物盖度的增加,总氮的浓度不一定一直降低,将沉水植物盖度维持在50%,有利于营养物质的合理利用。有学者研究表明,溶解性固体总量与电导率呈正相关关系(叶能权等,1992),与本文的研究结果一致。在不同沉水植物盖度中,TDS和SPC最低值出现在C-50组中,表明盖度50%的沉水植物能够最大限度地降低溶解性固体物质,提高水体环境质量。

本试验中,不同盖度组浮游植物种类数多于对照组(除C-75组外),C-25组种类数最多,其次是C-50组。有学者研究发现,蓝藻门和绿藻门喜富营养水体生长(Lund,2010),本文中各组绿藻门比例最高且均在50%以上,蓝藻门的比例在20.07%~31.50%,表明不同沉水植物盖度下的水体均呈以绿藻门为主的富营养化。沉水植物通过化感作用抑制某些藻类的生长(陈德辉,2004;Nakai et al,2000),C-50组的蓝藻门比例显著低于其他组($P<0.05$),并且绿藻门和硅藻门的比例较高,说明盖度50%的沉水植物对某些藻类的化感作用效果较好,使得各门种类的比例维持在相对平衡状态。

优势种和优势度是评价生态系统的一个重要指标,当优势种较多并且优势度较低表明生态系统中生物分布较为均匀,生态系统更稳定(李京,2008)。本试验中,C-0组的优势种仅有2种,明显低于其他组(均有沉水植物分布),说明水体无沉水植物可能会导致水生态系统稳定性差,容易暴发水华等危害。优势种数量最多的是C-75组的10种,但相比于其他组,优势种蓝藻门较多,特别是易暴发蓝藻水华的鱼腥藻和中华尖头藻(Li et al, 2010)。与其他组相比,C-50组蓝藻门优势种数量最少,而且优美平裂藻(Tian et al,2012)和泽丝藻(Rose et al,2018)都不是暴发蓝藻水华的主要藻类;绿藻门优势种双对栅藻仅出现在C-50组,其能够去除水体中较高的氮磷比,维持水体的营养平衡(Rhee,1978)。各组共有的优势种有泽丝藻、色球藻和小环藻3种(C-0组没有色球藻),泽丝藻对湖泊水体的耐受性较强,适合在各种水体生存,分布较广(Rose et al,2018);C-0组没有色球藻可能是由于滤食性轮虫的分布造成的(刘歆璞等,2015)。本研究的各组中均未鉴定出重富营养型指示种,如铜绿微囊藻、不定微囊藻和尖尾蓝隐藻,进一步说明水体污染程度较低。总之,C-50组的优势种和优势度的分布情况说明白洋淀水生态系统中浮游植物分布较均匀,进而促进了沉水植物和浮游植物对湖泊中营养物质的合理利用,使白洋淀水生态系统维持在一个动态平衡。

有研究表明,沉水植物盖度与浮游植物密度呈负相关关系(Declerck et al,2005),本试验也验证了这一观点,表明有沉水植物的水体能够降低浮游植物的密度。浮游植物密度通常可以反映水体富营养化程度,特别是蓝藻细胞密度越高,水体富营养化程度越严重(王朝晖等,2004)。而本研究中所有组浮游植物密度占比最大的是蓝藻门和绿藻门,随着沉水植物盖度的增加,蓝藻门和绿藻门的密度降低。Qiu等(2001)研究发现,透明度高,则浮游植物密度低,这与本研究结果一致。浮游植物生物量随着沉水植物盖度的增加而降低,这与杨清心(1998)研究结果一致。李夜光等(2006)研究表明,浮游植物生物量的累积主要由水体中氮、磷等营养元素控制,只要2种元素的量供应充足,浮游植物的生物量就会持续增加。本文中C-0和C-25组氮磷含量与浮游植物生物量的关系也与之类似。各组生物量占比最高的是绿藻门,其次为硅藻门,而蓝藻门的生物量较低,这与蓝藻门密度较高不相符合。由于某些藻类(优美平裂藻)密度较高,但个体较小导致生物量较低,反之,密度较低,但个体较大导致生物量较高(刘

长东，2016），这可能是造成本试验中各组蓝藻门生物量较低和硅藻门生物量较高的原因之一。较低盖度组（C-0、C-25 组）的浮游植物生物量显著高于较高组（C-75、C-90 组）（$P<0.05$），而 C-50 组与其他组之间差异不显著（$P<0.05$），表明沉水植物盖度超过 50%（临界值）时，浮游植物生物量没有明显的变化。综合沉水植物与浮游植物互利共生和行船方便的情况，盖度 50%的沉水植物可能更有利于浮游植物密度和生物量维持在一个相对稳定的水平。

Margalef 指数对物种数的依赖程度较强，它能充分反映物种的分布情况。本试验 Margalef 指数最大和最小值出现在 C-50 和 C-0 组，说明沉水植物盖度为 50%时浮游植物对物种的依赖程度强，没有沉水植物水体的浮游植物对物种的依赖程度较小。Shannon-Weiner 多样性指数反映了水体中浮游植物群落的复杂性，数值越大，群落结构越复杂，水生态系统稳定性越强；Pielou 均匀度指数反映了浮游植物各物种数在水体中的分配均匀程度，但 C-0 组较高的 Shannon-Weiner 多样性指数和 Pielou 均匀度指数与水体评价结果有悖，这与孙军等（2004）对苏州河生态修复过程中水体评价结果一致。

不同水体中浮游植物群落受环境因素的影响存在差异。陈红等（2019）对灞河城市段研究结果表明，水温、总氮、pH、溶解氧和汞是浮游植物群落分布的主要影响因子；闫苏苏等（2018）对长寿湖浮游植物功能群季节变化及影响因子的研究表明，透明度、水温、电导率、光照强度、溶解氧和总氮是影响长寿湖浮游植物功能群变化的主要环境因子。本研究表明，浮游植物群落结构与 TDS、SPC、pH、Chl-a、COD_{Mn}和透明度密切相关。水温是影响浮游植物生长和数量变化的极为重要的环境因子，也是影响其水平分布的一个重要因素（黄国佳等，2015），本研究区域鲃鲅淀相对独立，几乎不受外界水体的干扰，保持了整个淀区水温的相对稳定。所以，在不同沉水植物盖度的水体中优势藻类几乎不受水温的影响。

在不同沉水植物盖度的水体中，影响浮游植物群落结构的环境因子也存在差异。C-90 组的多数优势藻类与 COD_{Mn}呈负相关，这与刘洋等（2018）的研究结果相反，可能是由于水草较多堆积在湖面，在高温下腐烂分解，导致有机物含量升高。C-75 组浮游植物群落主要受 TDS、SPC、pH 和透明度（SD）的影响，SD 是影响浮游植物群落结构变化的主要因素并对藻类生长具有重要作用（崔扬等，2014），C-75 组水体 SD 最高且与优势藻类群落呈负相关；同时 pH 也影响浮游植物的群落结构及分布（周彦锋等，2017）。C-50 和 C-25 组的优势藻类受环境因子的影响较小，说明沉水植物盖度维持在 50%和 25%时，水生态系统稳定且不易被外界环境因素破坏。C-0 组优势藻类功能群与 TP 含量呈正相关，浮游植物生物量和密度最高，这与高子涵等（2016）研究结果一致，表明无沉水植物的水域，营养物质促进了浮游植物的大量繁殖，从而导致水体藻型化。

本结果表明沉水植物盖度维持在 50%时，水体的总氮、总磷浓度水平最低，此盖度对水体中营养物质的吸收效果最好；不同盖度组的优势种显著高于对照组，而 C-50 组蓝藻门优势种最少，硅藻门和绿藻门比例较高；经 RDA 分析表明，白洋淀不同沉水植物盖度下水体浮游植物群落结构的变化分别受不同环境因子的影响，但 C-50 和 C-25 组浮游植物群落结构受环境因子的影响较小，说明水生态系统较稳定且受环境影响小。所以，结合不同沉水植物盖度下的水体理化指标和浮游植物群落结构的变化，沉水植物盖度维持在 50%时，能够提高白洋淀生态系统的稳定性。

参考文献

陈德辉，刘永定，宋立荣，2004. 蓖齿眼子菜对栅藻和微囊藻的他感作用及其参数[J]. 水生生物学报，28(2)：163－168.

陈红，刘清，潘建雄，等，2019. 灞河城市段浮游生物群落结构时空变化及其与环境因子的关系[J]. 生态学报，39(1)：173－184.

崔扬，朱广伟，李慧赟，等，2014. 天目湖沙河水库水质时空分布特征及其与浮游植物群落的关系[J]. 水生态学杂志，35(3)：10－18.

邓文丽，刘均平，王晓星，等，2013. 北京野鸭湖浮游植物群落结构与水质关系研究[J]. 湿地科学，11(1)：27－34.

高子涵，张健，皮杰，等，2016. 湖南省大通湖浮游动物群落结构及其与环境因子关系[J]. 生态学杂志，35(3)：733－740.

国家环境保护总局，水和废水监测分析方法编委会，2002. 水和废水监测分析方法[M]. 四版. 北京：中国环境科学出版社，236－257.

胡鸿钧，魏印心，2006. 中国淡水藻类－系统、分类及生态[M]. 北京：科学出版社.

黄国佳，李秋华，陈椽，等 2015. 贵州高原红枫湖水库浮游植物功能分组及其时空分布特征[J]. 生态学报，35(17)：5573－5584.

刘长东，易坚，郭晓峰，等，2016. 荣成俚岛人工鱼礁区浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 中国海洋大学

学报(自然科学版),46(3):50-59.
刘歆璞,张玮,王丽卿,等,2015. 青草沙水库浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 上海海洋大学学报,24(4):532-543.
刘洋,吕俊平,刘琪,等,2018. 太原汾河蓄水区浮游植物细胞密度及其与营养元素的关系[J]. 生态学报,38(3):991-1002.
李京,2008. 东海赤潮高发区营养盐结构及对浮游植物优势种演替的作用研究[D]. 青岛:中国海洋大学.
李夜光,李中奎,耿亚红,等,2006. 富营养化水体中N、P浓度对浮游植物生长繁殖速率和生物量的影响[J]. 生态学报,(2):317-325.
宋芳芳,2012. 富营养化水体中浮游植物群落对沉水植物生境的响应[D]. 上海:上海海洋大学.
孙军,刘东艳,2004. 多样性指数在海洋浮游植物研究中的应用[J]. 海洋学报(中文版),(1):62-75.
王朝晖,林秋奇,胡韧,等,2004.广东省水库的蓝藻污染状况与水质评价[J]. 热带亚热带植物学报,(2):117-123.
杨清心,1998. 东太湖水生植被的生态功能及调节机制[J]. 湖泊科学,(1):67-72.
杨旻,吴小刚,张维昊,等,2007. 富营养化水体生态修复中水生植物的应用研究[J]. 环境科学与技术,30(7):98-102.
闫苏苏,雷波,刘朔孺,等,2018. 长寿湖浮游植物功能群季节变化及影响因子[J]. 水生态学杂志,39(3):52-60.
叶能权,陈利平,黄春英,1992. 西江水体电导率与溶解性固体的相关性研究[J]. 中国公共卫生,(10):455-456.
张圣照,王国祥,濮培民,等,1999. 东太湖水生植被及其沼泽化趋势[J]. 植物资源与环境学报,(2):1-6.
章宗涉,1998.水生高等植物-浮游植物关系和湖泊营养状态[J]. 湖泊科学,(4):83-86.
赵翔,崔保山,杨志峰,2005.白洋淀最低生态水位研究[J]. 生态学报,25(5):1033-1040.
周彦锋,宋江腾,刘凯,等,2017. 怀洪新河浮游植物群落结构与水环境因子的关系研究[J]. 生态科学,36(1):35-42.
Dai Y,Jia C,Liang W,et al,2012. Effects of the submerged macrophyte Ceratophyllum demersum L. on restoration of a eutrophic waterbody and its optimal coverage[J]. Ecological Engineering,40(3):113-116.
Declerck S, Vandekerkhove J, Johansson L, et al, 2005. Multi-group biodiversity in shallow lakes along gradients of phosphorus and water plant cover[J]. Ecology, 86(7):1905-1915.
Hough R A,1989. Plant community dynamics in a chain of lakes: principal factors in the decline of rooted macrophytes with eutrophication[J]. Hydrobiologia,173:199-217.
Li Z ,Yu J ,Yang M ,et al,2010. Cyanobacterial population and harmful metabolites dynamics during a bloom in Yanghe Reservoir, North China[J]. Harmful Algae,9(5):481-488.
Lund J W G,2010. The ecology of the freshwater phytoplankton[J]. Biological Reviews,40(2):231-290.
Nakai S,Inoue Y,Hosomi M,et al,2000. Myriophyllum spicatum-released allelopathic polyphenols inhibiting growth of blue-green algae Microcystis aeruginosa[J]. Water Research,34(11):3026-3032.
Qiu D R,Wu Z B,Liu B Y,et al,2001. The restoration of aquatic macrophytes for improving water quality in a hypertrophic shallow lake in Hubei Province, China[J]. Ecological Engineering,18(2):147-156.
Rhee,1978. Effects of N:P atomic ratios and nitrate limitation on algal growth, cell composition, and nitrate uptake[J]. Limnology & Oceanography,23(1):10-25.
Rose A K,Larelle F,Susan K,2018. Cyanobacteria breakthrough: Effects of Limnothrix redekei contamination in an artificial bank filtration on a regional water supply [J]. Harmful Algae, 76:1-10.
Sagrario M A G,Jeppesen E,Goma J,et al,2005. Does high nitrogen loading prevent clear-water conditions in shallow lakes at moderately high phosphorus concentrations? [J]. Freshwater Biology,50(1): 27-41.
Scheffer M,Hosper S H,Meijer M L,et al,1993. Alternative equlibria in shallow lakes [J]. Trends in Ecology and Evolution, 8(8): 275-279.
Scheffer M,2001. Alternative Attractors of Shallow Lakes [J]. The Scientific World JOURNAL, 1:254-263.
Seitzinger S P,1991. The effect of pH on the release of phosphorus from Potomac estuary sediments: Implications for blue-green algal blooms[J]. Estuar. coast. shelf Sci, 33(4):409-418.
Tian C ,Pei H ,Hu W ,et al,2012. Variation of cyanobacteria with different environmental conditions in Nansi Lake,China[J].Journal of Environmental Sciences (China), 24(8):1394-1402.

(责任编辑 张俊友 郑金秀)

Phytoplankton Community Structure in Baiyangdian Lake with Different Submerged Macrophyte Coverages

ZHANG Jun-wang[1,2], XIE Jun[1,3], LI Zhi-fei[1,3], ZHANG Xiao-ke[4], WANG Guang-jun[1,3], ZHANG Kai[1,3], LIU Yang[1,2], XIAO Guo-hua[5]

(1.Pearl River Fishery Research Institute, Chinese Academy of Fisheries Sciences, Key Laboratory of Tropical & Subtropical Fishery Resource Application and Cultivation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510380, P.R.China;
2.College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, P.R.China;
3.Guangdong Ecological Remediation of Aquaculture Pollution Research Center, Guangzhou 510380, P.R.China;
4.Research Center of Aquatic Organism Conservation and Water Ecosystem Restoration in Anhui Province, Anqing Normal University, Anqing 246133, P.R.China;
5.Ocean Fisheries Research Institute of Hebei Province, Qinhuangdao 066200, P.R.China)

Abstract: Research shows that submerged macrophytes within an appropriate coverage range benefits nutrient uptake and stabilizes aquatic ecosystems. Baiyangdian Lake is the largest shallow lake in the North China Plain. It consists of more than 100 small and shallow lakes connected to each other by thousands of channels, and the submerged macrophyte coverage varies greatly between different water areas. In this study, we investigated the phytoplankton community structure under different macrophyte coverages and determined the optimal submerged macrophyte coverage, based on the physical and chemical parameters of water body and phytoplankton community characteristics. The objective was to provide a theoretical basis for ecological restoration in Baiyangdian Lake. In July 2018, the phytoplankton community and related environmental factors were investigated in the Shihoudian area of Baiyangdian Lake. Five submerged macrophyte coverages were set in triplicate: C-0 (0%), C-25 (25%), C-50 (50%), C-75 (75%) and C-90 (90%). All macrophyte coverages effectively reduced total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total dissolved solids (TDS) and specific conductance (SPC), but the concentrations of TN and TP were lowest with the C-50 treatment. The number of phytoplankton species was higher in the treatment groups than in the control group (C-0), with dominance by Chlorophyta species in all groups (>50% of total species). The dominant Cyanophyta species in group C-50 were the least dominant group of species and the proportion was significantly lower than that of other groups ($P<0.05$). Phytoplankton density and biomass decreased as macrophyte coverage increased, with Cyanophyta and Chlorophyta dominating all groups. The Shannon-Weiner diversity and Pielou evenness indices of the phytoplankton community increased with coverage, while the Margalef richness index initially increased, then decreased with increasing macrophyte coverage. Redundancy analysis shows that phytoplankton communities in C-90, C-75 and C-0 were primarily affected by the environmental factors TDS, SPC, pH, chlorophyll-a, COD_{Mn} and transparency. The phytoplankton communities in C-50 and C-25 were less affected by environmental factors, indicating that aquatic systems with this coverage range were more stable and less affected by environmental conditions. In conclusion, TDS, SPC, TN and TP concentrations of the water body were the lowest in the C-50 group. The proportion and dominant species of Cyanophyta were lower, and the Margalef index was highest. These results are of practical importance for ecological restoration of Baiyangdian Lake.

Key words: coverage; submerged macrophyte; Baiyangdian Lake; phytoplankton community structure