

鲃鯢淀不同沉水植被盖度下夏秋季底栖动物群落结构及变化规律

张军旺, 谢骏, 李志斐, 王广军, 张晓可, 张凯, 刘阳

Zoobenthos community structure and variation under different submerged macrophyte coverage in Shihoudian sub-lake in summer and autumn

ZHANG Junwang, XIE Jun, LI Zhifei, WANG Guangjun, ZHANG Xiaoke, ZHANG Kai, LIU Yang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20200503070>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[长江口明珠湖大型底栖动物群落结构特征与水质评价](#)

Macroinvertebrate community structure and the biological assessment to water quality of Mingzhu Lake near the Yangtze River Estuary

上海海洋大学学报. 2020, 29(5): 699 <https://doi.org/10.12024/jsou.20190502655>

[长江口北支滩涂贝类放流对潮下带大型底栖动物群落的影响](#)

Effects of shellfish release on macrobenthic communities in the subtidal zone in the northern branch of the Yangtze River Estuary

上海海洋大学学报. 2019, 28(2): 277 <https://doi.org/10.12024/jsou.20181002416>

[春季闽北海域大型底栖动物群落特征及环境质量分析](#)

Research on community characteristics of macrozoobenthos and environmental quality of offshore North Fujian in spring

上海海洋大学学报. 2018, 27(2): 238 <https://doi.org/10.12024/jsou.20170902125>

[基于枝角类和桡足类多样性的白洋淀水环境监测与评价](#)

Evaluation and monitoring of the water environment based on the diversity of Cladocera and Copepods in Baiyangdian Lake

上海海洋大学学报. 2021, 30(6): 1013 <https://doi.org/10.12024/jsou.20200403022>

[应用底栖动物功能摄食群评价东苕溪下游生态系统健康状况](#)

Application of macroinvertebrate functional groups to estimate the ecosystem health in the downstream of the East Tiaoxi River

上海海洋大学学报. 2018, 27(1): 91 <https://doi.org/10.12024/jsou.20170502062>

文章编号: 1674-5566(2022)01-0107-12

DOI:10.12024/jsou.20200503070

鲢鳙淀不同沉水植被盖度下夏秋季底栖动物群落结构及变化规律

张军旺^{1,2}, 谢 骏^{1,3}, 李志斐^{1,3}, 王广军^{1,3}, 张晓可⁴, 张 凯^{1,3}, 刘 阳^{1,2}

(1. 中国水产科学研究院珠江水产研究所 农业农村部热带亚热带水产资源利用与养殖重点实验室, 广东 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, 广东 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, 安徽 安庆 246133)

摘 要: 为研究在不同沉水植被盖度下夏秋季底栖动物群落结构及变化规律, 于 2018 年 7 月(夏季)和 10 月(秋季)在鲢鳙淀选取了 4 个盖度水平区域, 分别为 25%、50%、75% 和 90% (C-25、C-50、C-75、C-90), 以及一个无沉水植物的对照组区域(C-0), 分别测定分析各区域的水体理化参数和底栖动物群落结构特征。结果表明: 沉水植物可有效降低总氮(TN)和总磷(TP)浓度。共采集底栖动物 19 种, 隶属于 3 门 4 纲 19 属, 其中, 水生昆虫、腹足类、寡毛类和瓣鳃类种类数占比分别为 68.42%、15.79%、10.52% 和 5.26%, C-90、C-75、C-50、C-25 和 C-0 组底栖动物种类数分别为 10、8、11、9 和 3 种。底栖动物 Shannon-Weiner 多样性指数和 Margalef 丰富度指数随沉水植被盖度的增加呈先升高后降低的趋势, 其中 C-50 组底栖动物的两种多样性指数均显著高于其他组($P < 0.05$)。盖度、季节以及二者的交互效应对底栖动物密度和生物量均有显著影响($P < 0.05$), 且夏季 C-50 组腹足类的生物量显著高于其他组($P < 0.05$)。透明度、总溶解性固体颗粒(TDS)和电导率(SPC)是影响夏秋季底栖动物分布的主要环境因子。盖度为 50% 左右时, TDS、SPC、TN 和 TP 浓度最低, 底栖动物种类数、Shannon-Weiner 多样性指数和 Margalef 丰富度指数最高。

关键词: 鲢鳙淀; 白洋淀; 沉水植被; 盖度; 底栖动物

中图分类号: Q 958.8; P 131 **文献标志码:** A

近年来, 白洋淀流域人口密度不断增大, 人为因素产生的工业污水、生活废水和农业面源污染加剧了白洋淀的富营养化程度, 导致水生态系统的净化能力逐渐降低、水质逐年恶化^[1]。有研究^[2]表明, 草型淀区的面积不足 20%, 藻型淀区面积约 30%, 剩余一半淀区为草-藻过渡型。在藻型淀区和草-藻过渡型淀区中, 一般水生植被盖度低, 藻类大量繁殖, 水体营养水平总体维持在较高水平。但在一些草型淀区(如鲢鳙淀、藻荇淀等), 沉水植被过度繁殖, 使整个淀区面临着沼泽化趋势。目前, 鲢鳙淀是白洋淀草型湖泊的代表之一, 主要表现沉水植被种类单一、不同区域盖度也不一致, 夏季和秋季以穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)和篦齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)为主。所以, 探索浅水型淀区中沉水植被的最适盖度对于修复白洋淀水

域生态环境具有重要意义。

在湖泊生态系统中底栖动物不仅为大型水生动物提供饵料, 还能加速湖底碎屑的降解, 在湖泊生态系统物质和能量的循环中具有重要作用^[3-4]。刘建康等^[5]研究发现, 沉水植被生物量与软体动物的生物量呈正相关, 表明两者具有互利共生的关系。也有研究^[6-8]表明, 在沉水植被分布较多的水域, 底栖动物多样性、密度和生物量均高于无沉水植被水体, 且底栖动物生物量与沉水植被生物量呈显著正相关; 同时, 沉水植被盖度与底栖动物的生物多样性指数和物种数均呈显著的线性正相关^[9-10]。白秀玲等^[11]对不同生态湖区螺和沉水植被分布的研究中发现, 典型草型湖区的底栖动物主要以大型软体动物为主, 而沉水植被分布较少的藻型湖区, 寡毛类和摇蚊类为主要的优势种群。

收稿日期: 2020-05-31 修回日期: 2021-03-10

基金项目: 农业农村部财政专项(2130106-ZJBYD)

作者简介: 张军旺(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水域生态修复。E-mail: zjwj0922@163.com

通信作者: 王广军, E-mail: wgj5810@163.com

目前,在浅水湖泊中沉水植被的修复已成为一种流行的净水方式,因为它具有极强吸收营养物质的能力和经济环保等优点。吴家乐等^[12]在研究沉水植被对湖北洋湖富营养化修复中发现,在治理前修复区沉水植被盖度为0,寡毛类的相对密度为78%,修复区沉水植被盖度增加到70%时,寡毛类相对密度下降58%,且软体动物的相对密度增加,表明了沉水植被盖度的增加能够降低耐污种的相对密度,为清洁种营造了良好的生存条件。也有研究^[13]发现,沉水植被盖度越高寡毛类密度越低。总体而言,尽管较高盖度的沉水植被能吸收水生态系统中的营养盐,达到净化水体的目的,但其腐烂不仅污染水质,而且沉积的残渣加速了湖泊沼泽化进程^[14];较低的水生植被盖度不能有效降低湖泊营养物质浓度,还会造成营养盐的大量积累,继而导致藻类暴发,迫使水生植被失去有利的竞争优势,从而加快了湖泊藻型化趋势^[15]。因此,有必要对浅水湖泊中沉水植被的最适盖度进行研究。目前,虽然关于沉水植被盖度与底栖动物群落结构的研究有许多报告,但对浅水湖泊中不同沉水植被盖度下底栖动物群落结构的时空动态研究较少,也没有明确提出维持水生态系统健康所需的最适植被盖度。

选择白洋淀子淀鲢淀作为研究地点,选定植被盖度依次为0% (C-0)、25% (C-25)、50% (C-50)、75% (C-75)和90% (C-90)的5个区域,于夏季和秋季对水质和底栖动物进行测定与分析,最后对最适沉水植被盖度进行初步评价,以期对白洋淀水域的生态修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 采样点设置

通过参照《湖泊富营养化调查规范》和《湖泊生态调查观测与分析》^[16],本实验在鲢淀选取5个不同沉水植被盖度区域,分别0% (C-0)、25% (C-25)、50% (C-50)、75% (C-75)、90% (C-90),其中C-0组无沉水植被分布作为对照组,每个盖度的水体各设置3个重复样点。各采样点底泥的全磷为 (0.60 ± 0.02) g/kg,有机质为 (14.05 ± 1.92) g/kg。采样点设置如图1所示。

沉水植被盖度的计算方法为网格法。具体

是将一根5 m长的PVC管平放在湖面作为参照物,然后使用改造过的多功能蓝牙连接可遥控的自拍杆对湖面 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的区域进行高空拍照;选取较完整的图片将其分隔为 $0.05 \text{ m} \times 0.05 \text{ m}$ 的100个小格,将沉水植被所占每个小格的面积累加,即可估算出该区域沉水植被的盖度。

1.2 样品采集与处理

于2018年7月和10月对鲢淀不同沉水植被盖度下的水质指标和底栖动物进行采样,且实验分析水样均为底层水。现场通过YSI多功能水质分析仪(Pro Plus)测定水体的温度(Temperature, Temp)、溶解氧(Dissolved oxygen, DO)、pH、电导率(Specific conductance, SPC)和总溶解性固体颗粒(Total dissolved solids, TDS);水深(Water depth, WD)和透明度(Transparency, SD)用塞氏盘当场测定;总氮(Total nitrogen)和总磷(Total phosphorus)等指标通过实验室标准方法^[17]测定。底栖动物采集采用 $1/16 \text{ m}^2$ 的彼得逊采泥器采集底泥,用60目的尼龙筛网过滤样品,将剩余的残渣装入样品袋带回实验室。然后将滤渣经80目筛网筛选后,将剩余的残渣放入解剖盘中挑出底栖动物的活体,并放在60 mL的小采样瓶中加入10%的甲醛溶液固定保存。利用解剖镜和显微镜鉴定分类^[18-19],然后用滤纸吸去表面的液体,放在万分之一的电子天平上称重,将结果折算成单位面积中底栖动物的密度和生物量。

1.3 数据分析

根据底栖动物物种的出现频率(f_i)和个体数量(N_i)与总数量(N)的比值来计算优势度,具体公式如下:

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

式中: Y 代表优势度,当 $Y \geq 0.02$ 时,确定为优势种。

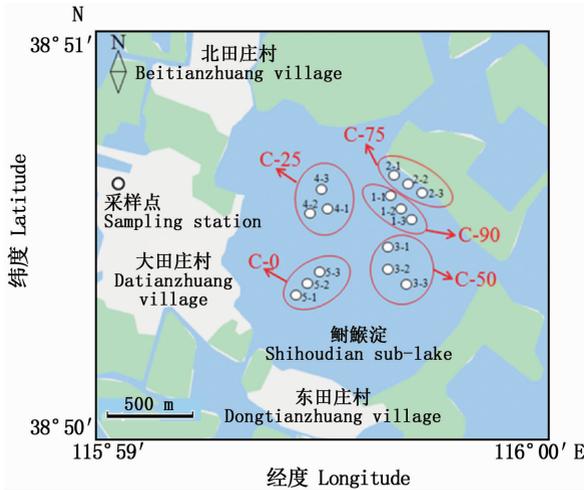
Shannon-Weiner多样性指数(H)、Margalef丰富度指数(D)、和Pielou均匀度指数(J)的计算公式分别为^[20-22]

$$H = - \sum P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$D = (S - 1) / \ln N \quad (3)$$

$$J = H / \ln S \quad (4)$$

式中: P_i 为物种 i 个体数所占的比例; S 为样品中种类总数, 种; N 为样品中所有物种的总个体数, 种。



C-90 代表沉水植被盖度 90%; C-75 代表沉水植被盖度 75%; C-50 代表沉水植被盖度 50%; C-25 代表沉水植被盖度 25%; C-0 代表对照组。
C-90 represent 90% coverage of submerged plants; C-75 represent 75% coverage of submerged plants; C-50 represents 50% coverage of submerged plants; C-25 represent 25% coverage of submerged plants; C-0 represent the control group.

图 1 鲢鳙淀不同沉水植被盖度下水体理化指标及底栖动物采样点分布
Fig. 1 Distribution of sampling sites for zoobenthos in Shihoudian sub-lake

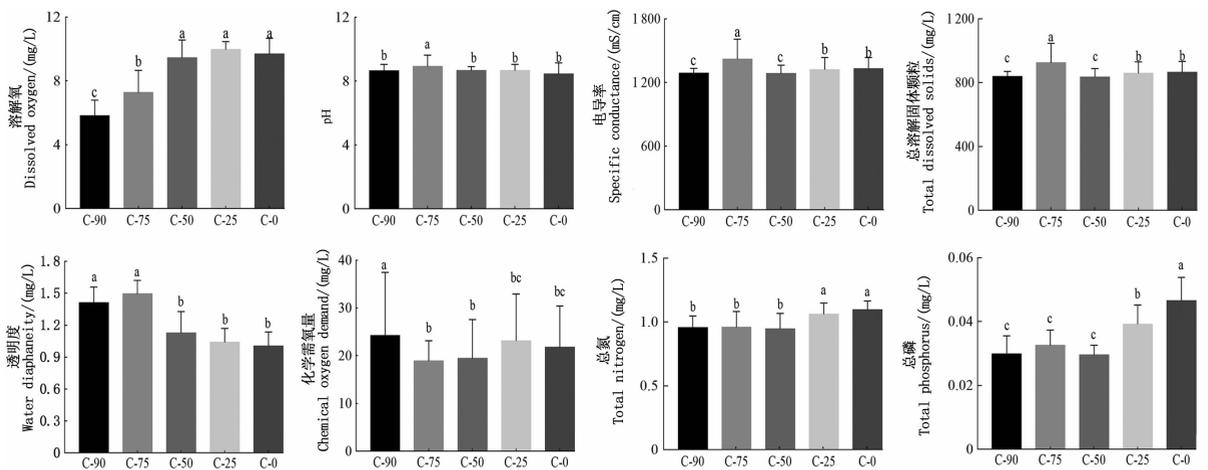
运用 SPSS 21.0 软件中的双因素方差分析

(Two-way ANOVA) 检验 5 个不同沉水植被盖度和季节对鲢鳙淀水体理化指标的影响及底栖动物密度、生物量和多样性指数的差异显著性: 若 $P < 0.05$, 表示存在显著差异; 如果存在显著差异, 则采用 Student-Newman-Keuls (S-N-K) 进行组间比较。采用 CANOCO 5.0 软件分析底栖动物群落结构与环境因子之间的关系^[23]。用 GraphPad Prism 7.00 作图。

2 结果

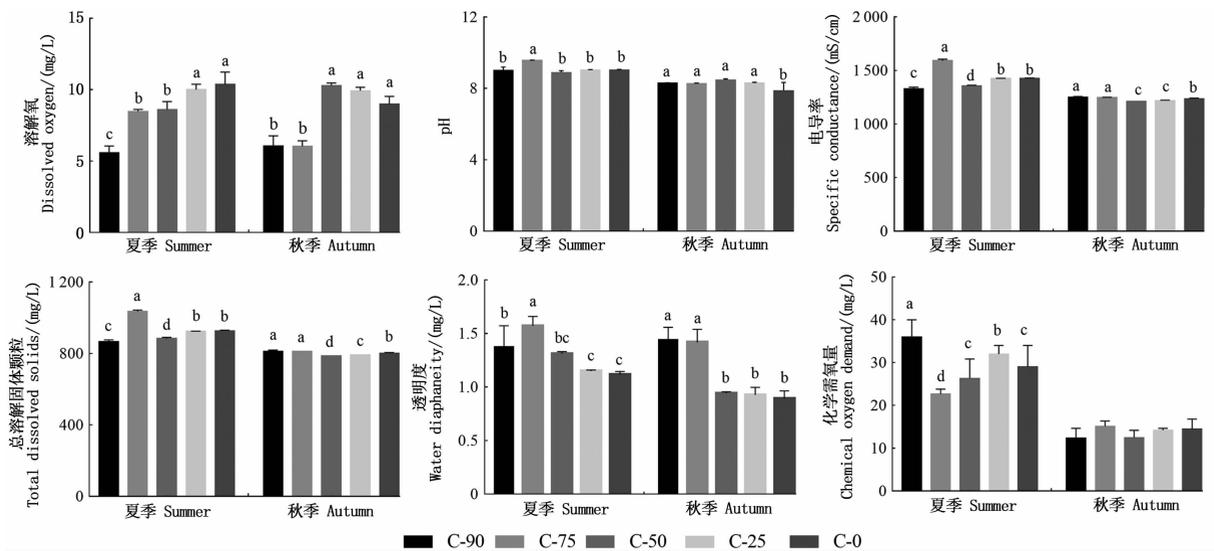
2.1 水体理化指标

双因素方差分析结果显示, 盖度对所有水体理化指标都存在显著影响 ($P < 0.01$), 但其变化趋势并不一致 (图 2)。与对照组相比, 当沉水植被存在时水体的 SD 明显更高, TN 和 TP 浓度更低, 但 SD 的最大值出现在 C-75 组, 而 TN 和 TP 的最低值均出现在 C-50 组。DO 随着盖度的增加表现出先上升后下降的趋势, 且最低值出现在植被盖度最高的 C-90 组。季节对 DO 和 TP 无显著影响 ($P > 0.05$), 而对其他指标均存在显著影响 ($P < 0.01$); 夏季的 SPC、TDS、pH、SD、TN 和 COD 显著高于秋季 ($P < 0.05$)。沉水植被盖度与季节的交互效应除对 TN 和 TP 无显著交互影响外, 对其余环境因子均有显著交互影响 ($P < 0.01$, 图 3)。



C-90、C-75、C-50、C-25 和 C-0 分别代表沉水植被盖度为 90%、75%、50%、25% 和 0%; 不同小写字母代表差异性显著 ($P < 0.05$)。
C-90, C-75, C-50, C-25 and C-0 represent 90%, 75%, 50%, 25% and 0% of submerged vegetation coverage respectively; the different letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

图 2 不同沉水植被盖度对鲢鳙淀水体理化指标的影响
Fig. 2 The effects of different submerged macrophyte coverages on physicochemical indexes of water body in Shihoudian sub-lake



C-90、C-75、C-50、C-25 和 C-0 分别代表沉水植被盖度为 90%、75%、50%、25% 和 0%；不同小写字母代表差异性显著 ($P < 0.05$)。C-90, C-75, C-50, C-25 and C-0 represent 90%, 75%, 50%, 25% and 0% of submerged vegetation coverage respectively; the different letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

图 3 盖度和季节交互效应对鲢鳙淀水体理化指标的影响

Fig. 3 The interaction effects between coverages and seasons on the physicochemical indexes of water body in Shihoudian sub-lake

2.2 不同沉水植被下底栖动物群落结构及季节变化

2.2.1 底栖动物种类组成及季节变化

共采集底栖动物 20 种, 隶属于 3 门 4 纲 19 属, 其中: 水生昆虫 13 种, 占总种类数的 68.42%; 腹足类 3 种, 占总种类的 15.79%; 寡毛类 2 种, 占总种类数的 10.53%; 瓣鳃类 1 种, 占总种类数的 5.26%。C-90、C-75、C-50、C-25 和 C-0 组分别采集到底栖动物 10、8、11、9 和 3 种 (表 1)。

2.2.2 底栖动物优势种的组成及季节变化

夏季在不同沉水植被盖度下的优势种主要是水生昆虫类。C-90 组的底栖动物优势种有 3 种, 包括寡毛纲的苏氏尾鳃蚓 (*Branchiura sowerbyi*)、昆虫纲的红裸须摇蚊 (*Prosilocerus akamusi*)、腹足纲的折叠萝卜螺 (*Radix plicatula*)；C-75 组的优势种有 2 种, 均为昆虫纲的红裸须摇蚊和幽蚊科一种 (*Chaoboridae*)；C-50 组的优势种有 3 种, 包括昆虫纲的红裸须摇蚊、幽蚊科一种和小摇蚊属一种 (*Microchironomus sp.*)；C-25 组优势种 1 种, 为昆虫纲的摇蚊属一种；C-0 组的优势种有 2 种, 包括寡毛纲的苏氏尾

鳃蚓和摇蚊属一种 (*Chironomus sp.*) (表 2)。

秋季各组底栖动物的优势种组成主要是水生昆虫；秋季 C-90 组底栖动物优势为红裸须摇蚊 (*Prosilocerus akamusi*)；C-75 组和 C-0 组的优势种均为红裸须摇蚊和幽蚊属一种 (*Chaoborus sp.*)；C-50 组的优势种有 4 种, 包括红裸须摇蚊、幽蚊属一种、环足摇蚊属一种 (*Cricotopus sp.*) 和拟摇蚊属一种 (*Parachironomus sp.*)；C-25 组的优势种有 3 种, 包括红裸须摇蚊、幽蚊属一种和环足摇蚊属一种；各组均有的优势种为红裸须摇蚊 (表 3)。

2.2.3 底栖动物密度的季节变化

夏季 C-90、C-75、C-50、C-25 和 C-0 组的底栖动物平均密度分别为 293、107、133、91 和 123 ind./m², C-90 组底栖动物平均密度明显高于其他组 ($P < 0.05$), 其中各组水生昆虫平均密度占总密度的 85.53% 左右。

秋季 C-90、C-75、C-50、C-25 和 C-0 组的底栖动物平均密度分别为 48、107、208、368 和 341 ind./m², 4 个实验组随沉水植被盖度的增加, 底栖动物平均密度表现出逐渐降低的趋势, 其各组密度全部来源于水生昆虫。

表 1 不同沉水植被盖度下底栖动物的种类组成

Tab. 1 Species composition of macrozoobenthos under different submerged plant coverages

种类 Taxa	C-90	C-75	C-50	C-25	C-0
寡毛类 Oligochaeta					
水丝蚓属一种 <i>Limnodrilus</i> sp.		+			
苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>	+		+		+
水生昆虫 Insecta					
摇蚊属一种 <i>Chironomus</i> sp.	+	+	+	+	
雕翅摇蚊属一种 <i>Glyptotendipes</i> sp.	+				
多足摇蚊属一种 <i>Polypedilum</i> sp.			+		
拟摇蚊属一种 <i>Parachironomus</i> sp.		+	+	+	
红裸须摇蚊 <i>Prosilocerus akamusi</i>	+	+	+	+	+
小摇蚊属一种 <i>Microchironomus</i> sp.		+	+	+	
环足摇蚊属一种 <i>Cricotopus</i> sp.			+		
斑摇蚊属一种 <i>Stictochironomus</i> sp.	+			+	
塘水螟属一种 <i>Elophila</i> sp.	+				
幽蚊属一种 <i>Chaoborus</i> sp.		+	+	+	+
幽蚊科 Chaoboridae		+	+		
径石蛾属一种 <i>Ecnomus</i> sp.	+				
螳科 Coenagrionidae	+	+			
腹足类 Gastropoda					
折叠萝卜螺 <i>Radix plicatula</i>	+				
纹沼螺 <i>Parafossarulus striatulus</i>	+		+	+	
长角涵螺 <i>Alocinma longicornis</i>					
瓣鳃类 Lamellibranchia				+	
无齿蚌一种 <i>Anodonta</i> sp.			+	+	

表 2 不同沉水植被盖度下夏季底栖动物群落优势种的优势度分布

Tab. 2 Dominance distribution of macrozoobenthos dominant species under different submerged plant coverages in summer

优势种 Dominant species	优势度 Y				
	C-90	C-75	C-50	C-25	C-0
苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>	0.024				0.054
红裸须摇蚊 <i>Prosilocerus akamusi</i>	0.054	0.024	0.054		
幽蚊科 Chaoboridae		0.054	0.054		
小摇蚊属 <i>Microchironomus</i> sp.			0.024		
摇蚊属 <i>Chironomus</i> sp.				0.054	0.054
折叠萝卜螺 <i>Radix plicatula</i>	0.024				

表 3 不同沉水植被盖度下秋季底栖动物群落优势种的优势度

Tab. 3 Dominance distribution of dominant species of macrozoobenthos community under different coverage of submerged plants in autumn

优势种 Dominant species	优势度 Y				
	C-90	C-75	C-50	C-25	C-0
红裸须摇蚊 <i>Prosilocerus akamusi</i>	1.000	0.450	0.103	0.803	0.938
幽蚊属 <i>Chaoborus</i> sp.		0.500	0.385	0.075	0.031
环足摇蚊属 <i>Cricotopus</i> sp.			0.051	0.028	
拟摇蚊属 <i>Parachironomus</i> sp.			0.231		

双因素方差分析结果表明: 盖度对总密度、腹足类密度和水生昆虫类密度均存在极显著

响 ($P < 0.01$), 但对寡毛类密度无显著影响; C-75 组底栖动物密度与水生昆虫密度显著低于对照

组和 C-25 组 ($P > 0.05$), 对照组和 C-75 组腹足类密度显著低于其他组 (图 4)。

季节对底栖动物总密度、寡毛类密度、腹足类密度和水生昆虫密度均有显著影响 ($P < 0.05$), 夏季腹足类密度和寡毛类密度显著高于

秋季, 而底栖动物总密度和水生昆虫密度显著低于秋季 ($P < 0.05$)。盖度与季节的交互效应对总密度、腹足类密度和水生昆虫密度具有极显著影响 ($P < 0.01$), 但对寡毛类密度无显著影响 (图 5)。

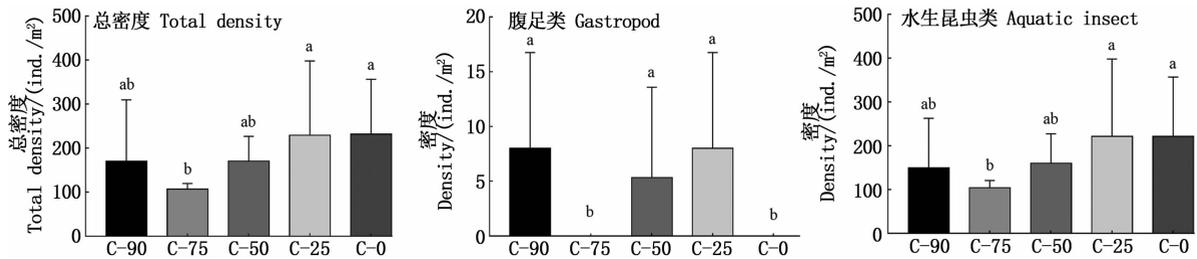


图 4 不同沉水植被盖度对鲢鳙淀底栖动物密度的影响

Fig. 4 Effects of different submerged plant coverages on macrozoobenthos density in Shihoudian sub-lake

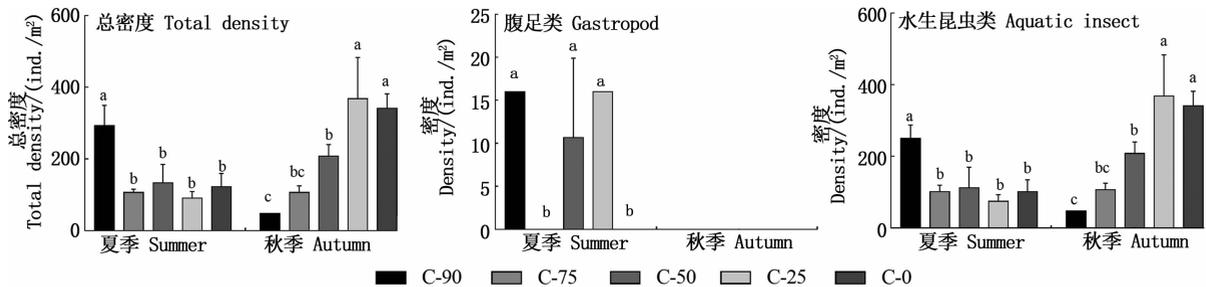


图 5 盖度与季节的交互效应对鲢鳙淀底栖动物密度的影响

Fig. 5 The interaction effects between coverages and seasons on the macrozoobenthos density in Shihoudian sub-lake

2.2.4 底栖动物生物量的季节变化

夏季 C-90、C-75、C-50、C-25 和 C-0 组底栖动物平均生物量分别为 4.92 mg/m^2 、 0.31 mg/m^2 、 49.25 mg/m^2 、 2.75 mg/m^2 和 3.41 mg/m^2 ; C-50 组底栖动物生物量明显高于其他组 ($P < 0.05$), 其腹足类和瓣鳃类生物量之和占总生物量的 98.52%, 其他组生物量主要来源于水生昆虫。秋季 C-90、C-75、C-50、C-25 和 C-0 组底栖动物平均生物量分别为 0.48 mg/m^2 、 0.74 mg/m^2 、 1.09 mg/m^2 、 4.62 mg/m^2 和 2.13 mg/m^2 , 5 个处理组生物量全部来源于水生昆虫; 随沉水植被盖度的增加, 底栖动物平均生物量表现出先上升后下降的趋势。双因素方差分析结果表明: 盖度对总生

物量、寡毛类生物量、腹足类生物量和水生昆虫类生物量均有极显著影响 ($P < 0.01$); C-50 组底栖动物总生物量和腹足类生物量显著高于其他组 ($P < 0.05$), 且其他组之间差异不显著; 对照组和 C-25 组水生昆虫类生物量显著高于其他 3 组 (图 6)。季节对底栖动物总生物量、寡毛类生物量、腹足类生物量有极显著影响 ($P < 0.01$), 但对水生昆虫类生物量无显著影响; 夏季底栖动物总生物量、寡毛类生物量和腹足类生物量显著高于秋季, 而水生昆虫生物量显著低于秋季。盖度与季节的交互效应对底栖动物总生物量、寡毛类生物量、腹足类生物量和水生昆虫生物量均具有极显著影响 ($P < 0.01$, 图 7)。

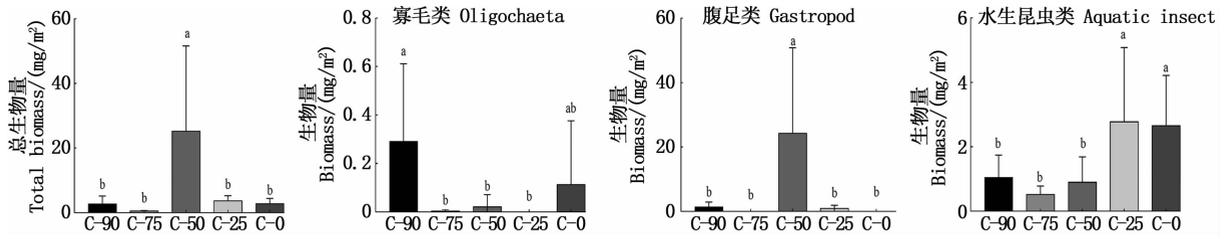


图 6 不同沉水植被盖度对鲢鳙淀底栖动物生物量的影响

Fig. 6 Effects of different submerged plant coverages on macrozoobenthos biomass in Shihoudian sub-lake

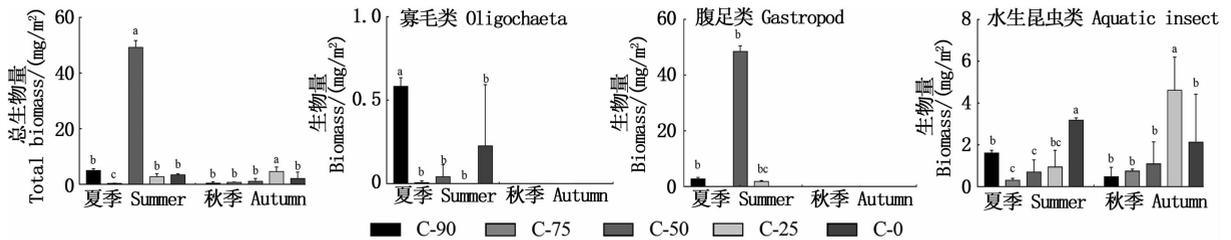


图 7 盖度与季节的交互效应对鲢鳙淀底栖动物生物量的影响

Fig. 7 The interaction effects between coverages and seasons on the macrozoobenthos biomass in shihoudian sub-lake

2.2.5 底栖动物物种多样性指数的动态变化

夏季底栖动物 Shannon-Weiner 多样性指数、Margalef 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数变化范围分别为 0.63 ~ 1.27、0.66 ~ 1.29 和 0.75 ~ 1.08。秋季底栖动物 Shannon-Weiner 多样性指数、Margalef 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数变化范围分别为 0 ~ 1.40、0 ~ 1.44 和 0 ~ 0.97。

双因素方差分析结果表明:盖度和季节对 Shannon-Weiner 多样性指数、Margalef 丰富度指数

和 Pielou 均匀度指数均具有极显著影响 (P < 0.01); C-50 组底栖动物 Shannon-Weiner 多样性指数和 Margalef 丰富度指数均显著高于其他组 (P < 0.05), 且其他组之间差异不显著 (P > 0.05, 图 8); 夏季底栖动物 3 种多样性指数均显著高于秋季。盖度与季节的交互效应对底栖动物 Shannon-Weiner 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均存在极显著影响 (P < 0.01), 但对 Margalef 丰富度指数无显著影响 (P > 0.05, 图 9)。

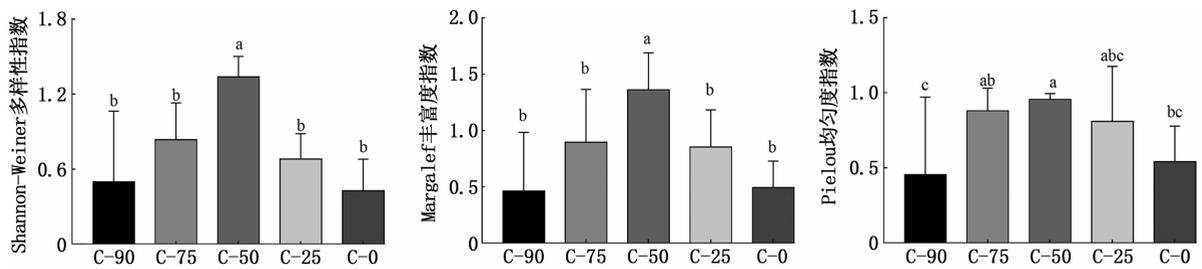


图 8 不同沉水植被盖度对鲢鳙淀底栖动物多样性指数的影响

Fig. 8 Effects of different submerged plant coverages on the macrozoobenthos diversity indexes in Shihoudian sub-lake

2.2.6 底栖动物群落结构与环境因子的关系

选取夏季 7 个底栖动物优势种分析与环境因子的关系,其第一排序轴长度是 5.8,所以选择 CCA 进行约束性分析。结果显示,前 3 轴的特征

值分别是 0.907、0.715 和 0.186,分别解释了 45.99%、36.27% 和 9.42% 的物种与环境因子关系变量,物种与环境因子关系的累积比率为 93.35%。结果表明,COD、SD、TDS、SPC 是影响夏

季底栖动物分布的主要环境因子(图 10)。TP 与第一排序轴呈正相关关系, TDS 和 SPC 与第二排序轴呈正相关, SD 与第一排序轴呈负相关, COD 与第二排序轴呈负相关。摇蚊属受 TP 的影响最

大, 小摇蚊属和幽蚊科受 SD 正相关性最大, 苏氏尾鳃蚓受 SD 负相关性最大, COD 与折叠萝卜螺的关系最为密切。

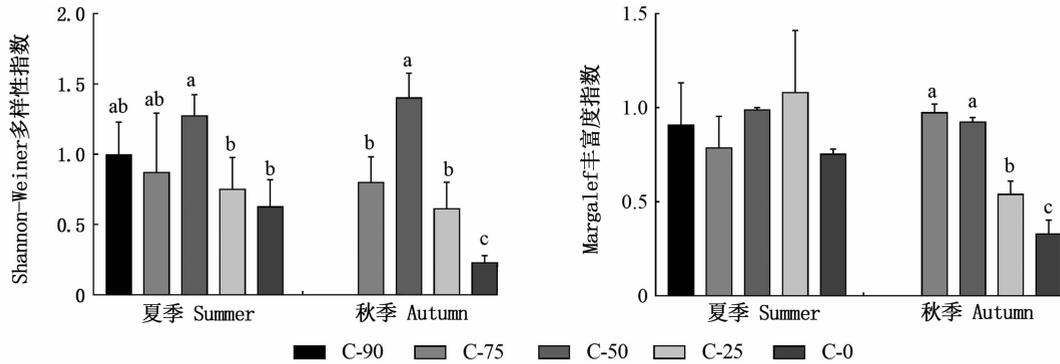


图 9 盖度与季节的交互效应对鲢鳙淀底栖动物多样性指数的影响
Fig. 9 The interaction effects between coverages and seasons on the macrozoobenthos diversity indexes in Shihoudian sub-lake

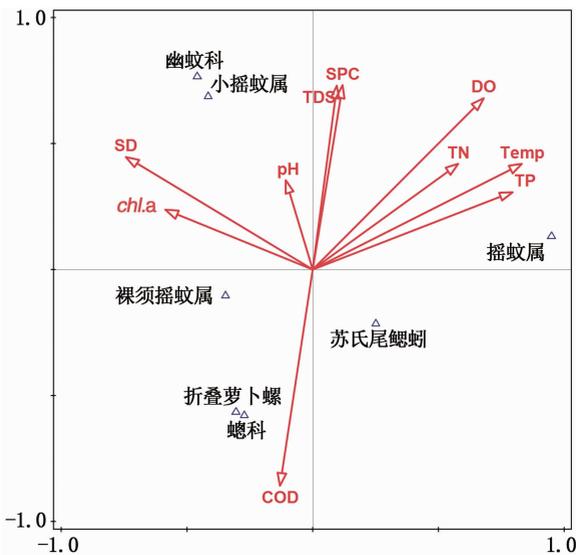


图 10 夏季底栖动物与水环境因子之间的 CCA 分析
Fig. 10 CCA analysis between macrozoobenthos and water environmental factors in summer

选取秋季 4 个底栖动物优势种分析与环境因子的关系, 结果显示, 第一排序轴的长度为 1.9, 所以选择 RDA 约束性分析。结果显示, 前 3 轴的特征值分别是 0.533、0.291 和 0.076, 分别解释了 55.32%、29.10% 和 7.57% 的物种与环境因子关系变量, 物种与环境关系的累积比率为 91.36%。结果表明, SD、TDS、SPC、DO 和 TN 是影响秋季底栖动物分布的主要环境因子(图 11)。pH 与第一排序轴呈正相关, TN 与第二排序轴呈

正相关, SPC 和 TDS 与第一排序轴呈负相关, SD 与第二排序轴呈负相关。红裸须摇蚊与 TN 正相关性最大, 幽蚊属受 DO 正相关性最大, 环足摇蚊属受 pH 正相关性最大, 拟摇蚊属受 SPC 负相关性最大。

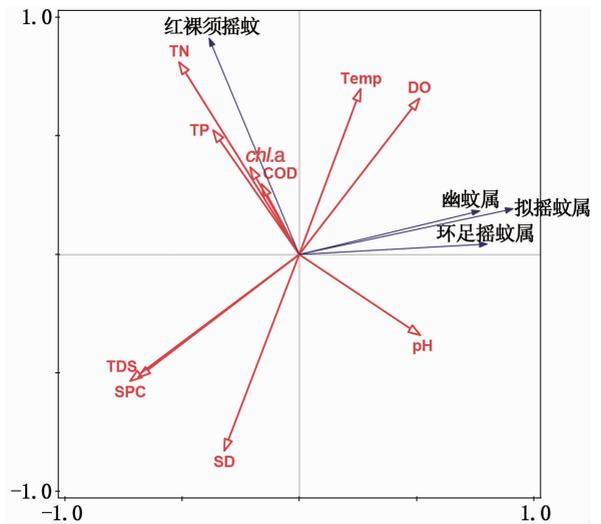


图 11 秋季底栖动物与水环境因子之间的 RDA 分析
Fig. 11 RDA analysis between zoobenthos and water environmental factors in autumn

3 讨论

3.1 不同沉水植被盖度对水质的影响

本实验中, C-90 和 C-75 组溶解氧浓度显著

低于其他组,但均不会影响水生动物的生存,造成此结果的原因可能是:1)高盖度的沉水植被堆积水面减少了水下光合作用^[24];2)具有较高盖度沉水植被的水生态系统为水生动物提供了良好栖息场所^[25],对溶解氧的消耗较大;3)沉水植被残体的分解消耗了大量氧气。这表明适当提高沉水植被的盖度对净化水质有利,但无限地提高沉水植被盖度不一定有利于水质的净化和稳健的生态系统的形成。与对照组相比(C-0组),4个实验组水体的透明度明显更高,总氮和总磷浓度更低,说明沉水植被存在时,降低水生态系统中营养盐的浓度,从而改善了水体环境^[26]。然而,水体透明度的最大值出现在C-75组,而并非在C-90组,这一现象可能也是由于过高盖度的沉水植被冠层堆积在湖面,高温下腐烂造成透明度下降。因此,将盖度保持在一定范围既有利于水生态系统的稳定,又能节省劳动力清理腐烂的沉水植被。有研究^[27-28]表明:氮和磷元素是污染白洋淀的主要环境因子,生活污水和工业废水的间接或直接入淀;其次是淀内营养物质的内循环造成的,加速了湖底氮磷营养物质的释放,生态环境被严重破坏。本研究中C-50组的总氮、总磷、总溶解性固体物质和电导率浓度均较低,则间接说明水体沉水植被盖度保持在50%左右时,对水体的净化效果最好。

3.2 不同沉水植被盖度对底栖动物种类结构的影响

谢松等^[27]鉴定出白洋淀底栖动物共23种,其中软体动物17种、占总种类数的73.91%;蔡端波等^[19]发现白洋淀底栖动物17种,软体动物14种,占总种类数的82.35%;孙泉琼等^[29]在2018年发现白洋淀底栖无脊椎动物为16种;本研究共采集底栖动物19种,主要由水生昆虫类组成。以上研究发现,底栖动物的种类数差异较小,可能是底栖动物具有活动范围相对固定、生命周期较长、生活习性相对稳定等特点造成的^[30]。

有研究^[31]表明,颤蚓科一般生活在水生植被较少、水体环境较差的区域。本实验研究结果显示,夏季C-0组的优势种除水生昆虫摇蚊以外,寡毛类苏氏尾鳃蚓也是主要优势种之一,由于它是富营养水体的重要指示物种^[32],说明C-0组水体的营养盐水平较高,与实际测定结果一致。沉水

植物组底栖动物优势种均为水生昆虫,由于水生昆虫的主要食物来源是细菌和藻类,对水体悬浮物质的降低具有重要作用^[33]。夏秋季C-50组的优势种数量均高于其他组,且拟摇蚊属是不同盖度组中仅有的优势种。从图11看出,拟摇蚊属主要与溶解氧呈正相关,与影响沉水植物生存的TDS和SPC呈负相关,说明拟摇蚊属一般生活在水生植被存在的区域。

3.3 不同沉水植被盖度对底栖动物密度和生物量的影响

夏秋季节,对照组底栖动物密度均保持了较高水平,可能与底质类型有关。在无沉水植被覆盖的C-0组,底质类型主要为淤泥,该底质类型适合寡毛类和摇蚊的栖息,因此二者均保持了较高的密度^[34-35]。在有水生植被存在的情况下,由于水生植物残体在水体底部的沉积,底泥中腐殖质含量较高,因此少有寡毛类分布^[36];本实验除C-90组外,其他沉水植被组均无寡毛类分布。此外,软体动物一般也是草型湖泊中的常见优势类群,有研究^[37]表明软体动物的密度随着营养盐水平的降低而升高。因为螺类多为刮食性动物,喜欢摄食沉水植被或其他物体表面的固着物,沉水植被的分布为其附着提供了良好条件,这也是为何在有沉水植被存在情况下腹足类(螺类)出现概率较高的原因。对长江中下游一些草型湖泊的研究结果还表明,主要优势种为腹足类的纹沼螺,其在富营养水体中难以生存^[38]。本研究中夏季C-50组腹足类的生物量占总生物量的98%左右,且明显高于其他各组,表明此环境非常适宜腹足类生存。

底栖动物密度和生物量存在明显的季节性,这与熊春晖等^[39]的研究结果一致,主要是由于许多底栖动物(尤其是水生昆虫)的生活史和生命活动具有明显的季节特征。本研究结果表明,在夏秋季,实验组的Shannon-Weiner多样性指数与Margalef丰富度指数均高于对照组,这主要是由于沉水植被为底栖动物提供了更加多样的栖息和繁育场所,同时也避免了底栖动物被捕食的风险,从而提高了生存的空间性^[40]。所以,沉水植被盖度维持在50%,能提高底栖动物的物种多样性,水域生态系统更加稳定。综上,本研究结果表明沉水植被盖度维持在50%左右时,所在区域水质和底质均最佳,底栖动物种类数和优势种数

最高,夏季腹足类的生物量占绝对优势。所以,沉水植被盖度维持在 50%,能够维持鲃鯮淀生态系统较高的稳定性。

参考文献:

- [1] 翟广恒, 李亚峰. 白洋淀水环境变化分析[J]. 水科学与工程, 2007(5): 45-46.
ZHAI G H, LI Y F. Analysis of water environment change in Baiyangdian [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2007(5): 45-46.
- [2] 刁晓君, 黄彩虹, 何连生, 等. 白洋淀草型与藻型湖泊沉水植物群落结构差异及影响因素[J]. 湿地科学, 2013, 11(3): 366-371.
DIAO X J, HUANG C H, HE L S, et al. Difference in community structure of submerged macrophytes and related influence factors between macrophytic and algal regions of Baiyangdian lake [J]. Wetland Science, 2013, 11(3): 366-371.
- [3] 乔雪, 刘其根, 陈丽平, 等. 长江口明珠湖大型底栖动物群落结构特征与水质评价[J]. 上海海洋大学学报, 2020, 29(5): 699-708.
QIAO X, LIU Q G, CHEN L P, et al. Macroinvertebrate community structure and the biological assessment to water quality of Mingzhu Lake near the Yangtze River Estuary[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2020, 29(5): 699-708.
- [4] BORCHERDING J, STURM W. The seasonal succession of macroinvertebrates, in particular the zebra mussel (*Dreissena polymorpha*), in the river Rhine and two neighbouring gravel-pit lakes monitored using artificial substrates [J]. International Review of Hydrobiology, 2002, 87(2/3): 165-181.
- [5] 刘建康. 东湖生态学研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 388-394.
LIU J K. Ecology of east lake[M]. Beijing: Science Press, 1990: 388-394.
- [6] 徐霖林, 马长安, 田伟, 等. 淀山湖沉水植物恢复重建对底栖动物的影响[J]. 复旦学报(自然科学版), 2011, 50(3): 260-267.
XU L L, MA C A, TIAN W, et al. Effects of recovery and reestablishment of submerged macrophytes on macrobenthos in lake Dianshan[J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2011, 50(3): 260-267.
- [7] HANSEN J P, WIKSTRÖM S A, AXEMAR H, et al. Distribution differences and active habitat choices of invertebrates between macrophytes of different morphological complexity[J]. Aquatic Ecology, 2011, 45(1): 11-22.
- [8] HAUSER A, ATTRILL M J, COTTON P A. Effects of habitat complexity on the diversity and abundance of macrofauna colonising artificial kelp holdfasts [J]. Marine Ecology Progress Series, 2006, 325(93): 93-100.
- [9] 渠晓东, 余杨, 张敏, 等. 城市河流沉水植物与大型底栖动物群落的关系[J]. 环境科学, 2018, 39(2): 783-791.
QU X D, YU Y, ZHANG M, et al. Relationship between macrophyte communities and macroinvertebrate communities in an urban stream [J]. Environmental Science, 2018, 39(2): 783-791.
- [10] 王金庆, ZHOU J, 吕卫光, 等. 水生植物覆盖度和水深对大型水生动物多样性的影响: 基于长江下游池塘的研究 [J]. 上海农业学报, 2017, 33(3): 65-70.
WANG J Q, ZHOU J, LYU W G, et al. Effect of aquatic plant coverage and water depth on the diversity of large aquatic animals: a study based on ponds in the lower reaches of the Yangtze River [J]. Acta Agriculture Shanghai, 2017, 33(3): 65-70.
- [11] 白秀玲, 谷孝鸿, 何俊. 太湖环棱螺 (*Bellamya* sp.) 及其与沉水植物的相互作用 [J]. 生态学报, 2009, 29(2): 1032-1037.
BAI X L, GU X H, HE J. *Bellamya* sp. and its interaction with submerged macrophytes in Lake Taihu [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 1032-1037.
- [12] 吴家乐, 甘磊, 刘素霞, 等. 修复对湖北洋澜湖富营养化与生态状况的影响: 基于大型无脊椎底栖动物的评价 [J]. 湖泊科学, 2019, 31(6): 1547-1558.
WU J L, GAN L, LIU S X, et al. Effect of restoration on the eutrophication and ecological status of Lake Yanglan (Hubei Province): assessment based on macroinvertebrates [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(6): 1547-1558.
- [13] PHIRI C, CHAKONA A, DAY J A. Macroinvertebrates associated with two submerged macrophytes, *Lagarosiphon ilicifolius* and *Vallisneria aethiopica*, in the Sanyati Basin, Lake Kariba, Zimbabwe: effect of plant morphological complexity [J]. African Journal of Aquatic Science, 2012, 37(3): 277-288.
- [14] 张圣照, 王国祥, 濮培民, 等. 东太湖水生植被及其沼泽化趋势 [J]. 植物资源与环境, 1999(2): 2-7.
ZHANG S Z, WANG G X, PU P M, et al. Succession of hydrophytic vegetation and swampy tendency in the East Taihu Lake [J]. Journal of Plant Resources and Environment, 1999(2): 2-7.
- [15] 刘建康. 高级水生生物学 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
LIU J K. Advanced aquatic biology [M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [16] 《全国主要湖泊、水库富营养化调查研究》课题组. 湖泊富营养化调查规范 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1987, 22-27.
Research Group on Eutrophication of Major Lakes and Reservoirs in China. Norms for eutrophication of lakes [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1987, 22-27.
- [17] 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, 236-257.

- State Environmental Protection Administration, Editorial Board of Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods. Water and wastewater monitoring and analysis methods[M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002:236-257.
- [18] SOLDAN T. Book review; aquatic insects of china useful for monitoring water quality [J]. *European Journal of Entomology*, 2013, 94(1): 152.
- [19] 蔡端波, 肖国华, 赵春龙, 等. 白洋淀底栖动物组成及对水质的指示作用[J]. *河北渔业*, 2010(3): 27-28.
CAI D B, XIAO G H, ZHAO C L, et al. Zoobenthos in Baiyangdian Lake: composition and the application in water quality monitoring[J]. *Hebei Fisheries*, 2010(3): 27-28.
- [20] SHANNON C E. A mathematical theory of communication [J]. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27(3): 379-423.
- [21] MARGALEF R. Information theory in ecology[J]. *General Systems*, 1958, 3: 36-71.
- [22] PIELOU E C. Species-diversity and pattern-diversity in the study of ecological succession [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, 10(2): 370-383.
- [23] TER BRAAK C J F, VERDONSCHOT P F M. Canonical correspondence analysis and related multivariate methods in aquatic ecology[J]. *Aquatic Sciences*, 1995, 57(3): 255-289.
- [24] SCHEFFER M. Alternative attractors of shallow lakes[J]. *The Scientific World Journal*, 2001, 1: 254-263.
- [25] 陈家长, 孟顺龙, 胡庚东, 等. 空心菜浮床栽培对集约化养殖鱼塘水质的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(2): 155-159.
CHEN J C, MENG S L, HU G D, et al. Effect of ipomoea aquatica cultivation on artificial floating rafts on water quality of intensive aquaculture ponds[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(2): 155-159.
- [26] 章宗涉. 水生高等植物-浮游植物关系和湖泊营养状态[J]. *湖泊科学*, 1998(4): 83-86.
ZHANG Z S. Macrophyte-phytoplankton relationship and lake trophic status[J]. *Journal of Lake Science*, 1998(4): 83-86.
- [27] 谢松, 黄宝生, 王宏伟, 等. 白洋淀底栖动物多样性调查及水质评价[J]. *水生态学杂志*, 2010, 3(1): 43-48.
XIE S, HUANG B S, WANG H W, et al. Assessment of water quality in Baiyangdian lake by zoobenthos biodiversity [J]. *Journal of Hydroecology*, 2010, 3(1): 43-48.
- [28] 陈新永, 田在铎, 胡晓波, 等. 网箱养殖对白洋淀草型湖泊水质的影响[J]. *水生态学杂志*, 2011, 32(1): 61-65.
CHEN X Y, TIAN Z F, HU X B, et al. Effects on water quality of weedy lake with cage culture in Baiyangdian lake [J]. *Journal of Hydroecology*, 2011, 32(1): 61-65.
- [29] 孙泉琼, 李宏昌, 廖晨延, 等. 白洋淀底栖无脊椎动物调查及水环境分析[J]. *河北渔业*, 2019(8): 40-44, 50.
SUN X Q, LI H C, LIAO C Y, et al. A Investigation of benthic invertebrates and analysis of water environment in Baiyangdian lake [J]. *Hebei Fisheries*, 2019(8): 40-44, 50.
- [30] BARBOUR M T, GERRITSEN J, SNYDER B D, et al. Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates, and fish[M]. 2nd ed. Washington: USEPA, 1999.
- [31] TAKAMURA N, ITO T, UENO R, et al. Environmental gradients determining the distribution of benthic macroinvertebrates in Lake Takkobu, Kushiro wetland, northern Japan [J]. *Ecological Research*, 2009, 24(2): 371-381.
- [32] 张敏, 蔡庆华, 唐涛, 等. 洱海流域湖泊大型底栖动物群落结构及空间分布[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(8): 1696-1702.
ZHANG M, CAI Q H, TANG T, et al. Macroinvertebrates community structure and its spatial distribution in Erhai watershed lakes[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(8): 1696-1702.
- [33] 赵文. 水生生物学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
ZHAO W. *Hydrobiology* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [34] MACINTYRE H L, GEIDER R J, MILLER D C. Microphytobenthos: the ecological role of the "secret garden" of unvegetated, shallow-water marine habitats. I. distribution, abundance and primary production [J]. *Estuaries*, 1996, 19(2): 186-201.
- [35] 陈博, 李卫明, 陈求稳, 等. 夏季漓江不同底质类型和沉水植物对底栖动物分布的影响[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(7): 1758-1765.
CHEN B, LI W M, CHEN Q W, et al. Effects of different bottom sediment and submerged macrophytes on macrofauna communities in the Lijiang River during the summer[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(7): 1758-1765.
- [36] THOMSON J R, HART D D, CHARLES D F, et al. Effects of removal of a small dam on downstream macroinvertebrate and algal assemblages in a Pennsylvania stream[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2005, 24(1): 192-207.
- [37] 梁彦龄, 刘伙泉. 草型湖泊资源、环境与渔业生态学管理(一)[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
LIANG Y L, LIU H Q. Resources, environment and fishery ecological management of macrophytic lakes [M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [38] 顾延生, 邱海鸥, 谢树成, 等. 湖北梁子湖近代沉积记录对人类活动的响应[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2008, 33(5): 679-686.
GU Y S, QIU H O, XIE S C, et al. Lake sediment records for eutrophication history in response to human activity during recent century in the Liangzi Lake, Hubei Province [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2008, 33(5): 679-686.

- [39] 熊春晖, 张瑞雷, 季高华, 等. 江苏溔湖大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 927-936.
XIONG C H, ZHANG R L, JI G H, et al. Community structure of macrozoobenthos and its relationship with environmental factors in Lake Gehu, Jiangsu, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(3): 927-936.
- [40] BARRY J P, DAYTON P K. Physical heterogeneity and the organization of marine communities [M]//KOLASA J, PICKETT S T A. Ecological Heterogeneity. New York: Springer, 1991: 270-320.

Zoobenthos community structure and variation under different submerged macrophyte coverage in Shihoudian sub-lake in summer and autumn

ZHANG Junwang^{1,2}, XIE Jun^{1,3}, LI Zhifei^{1,3}, WANG Guangjun^{1,3}, ZHANG Xiaoke⁴, ZHANG Kai^{1,3}, LIU Yang^{1,2}

(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, Guangdong, China; 2. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Guangdong Ecological Remediation of Aquaculture Pollution Research Center, Guangzhou 510380, Guangdong, China; 4. Research Center of Aquatic Organism Conservation and Water Ecosystem Restoration in Anhui Province, Anqing Normal University, Anqing 246133, Anhui, China)

Abstract: To evaluate the community structure and changes of zoobenthos in summer and autumn under different submerged vegetation coverage, in July (summer) and October (autumn) of 2018, four coverage levels were selected in Shihoudian Lake, which were 25%, 50%, 75%, and 90% (C-25, C-50, C-75, C-90), and the control group is the area without submerged plants (C-0), and the respectively determined and analyzed the water physical and chemical parameters and zoobenthos community structure characteristics of each area. The results showed that: Submerged plants effectively reduced the concentration of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP). A total of 19 species were collected, belonging to 3 phyla, 4 classes, and 19 genera. Among them, the proportions of aquatic insects, gastropods, oligochaetes, and Lamellibranchia species were 68.42%, 15.79%, 10.52% and 5.26%, respectively; The number of benthic species in groups C-90, C-75, C-50, C-25 and C-0 was 10, 8, 11, 9 and 3, respectively. The Shannon-Weiner diversity index and Margalef richness index of zoobenthos increased first and then decreased with the increase of submerged vegetation coverage. Among them, the two diversity indexes of Zoobenthos in the C-50 group were significantly higher than those in other groups ($P < 0.05$). Coverage, season, and the interaction effects of the two have significant effects on the density and biomass of zoobenthos ($P < 0.05$), and the biomass of gastropods in the C-50 group in summer was significantly higher than that of other groups ($P < 0.05$). Transparency, TDS and SPC are the main environmental factors affecting the distribution of Zoobenthos in summer and autumn. When the coverage is about 50%, the concentrations of TDS, SPC, TN and TP are the lowest, and the number of benthic species, Shannon-Weiner diversity index and Margalef richness index are the highest.

Key words: Shihoudian; Baiyangdian; submerged vegetation; coverage; zoobenthos