

## 不同成分培养基底栖动物生物量及水质评价

朱光艳<sup>1,2</sup>, 徐增洪<sup>1,2</sup>, 水燕<sup>1,2</sup>, 刘国锋<sup>1,2</sup>\*

(1. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心/农业农村部淡水渔业和种质资源利用

重点实验室, 江苏无锡 214081; 2. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 盐碱地渔业工程技术研究中心, 江苏无锡 214081)

**摘要** 为研究底栖动物生长发育情况, 采用4种不同成分的培养基对底栖动物的密度及生物量进行分析, 同时对水体中营养因子进行研究。结果表明: 培养基中底栖动物主要有3种底栖动物, 分别为摇蚊幼虫(Chironomid)、水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)与螺狮(*Bellamyia quadrata*)。生长季各培养基中底栖动物密度从大到小依次为糖蜜、腐殖酸、肥料、对照组, 底栖动物生物量分别为2.996 6、2.127 2、2.148 9和0.957 6 g/m<sup>2</sup>。采用理化分析对水体中营养因子进行分析评价, 对照组中NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N含量最高, 为(0.041±0.002)mg/L, 对照组中营养物质较少, 不适宜底栖动物及水生生物的生长; TN和TP含量分别为(1.455~2.493)和(0.391~0.665)mg/L, 培养基中水体不流通造成水体营养化, 水丝蚓耐污性极高, 底栖动物密度从大到小依次为水丝蚓、摇蚊幼虫、螺狮。对培养基中底栖动物密度与水体营养因子之间以及底栖动物密度之间进行相关性分析, 发现不同底栖动物密度之间相关性不明显, 水体中营养因子含量与摇蚊幼虫、水丝蚓密度的相关性较大, 呈负相关, 与螺狮密度的相关性较小, TP含量与底栖动物密度的相关系数大于TN。该研究结果可为日后虾蟹生长提供科学依据。

**关键词** 培养基; 底栖动物; 群落结构; 水质评价

中图分类号 X174; X824 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)03-0088-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.03.024



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Biomass and Water Quality Evaluation of Benthonic Animals Cultured with Different Components

ZHU Guang-yan<sup>1,2</sup>, XU Zeng-hong<sup>1,2</sup>, SHUI Yan<sup>1,2</sup> et al (1. Freshwater Fisheries Research Center of Chinese Academy of Fishery Sciences/Key Laboratory of Freshwater Fisheries and Germplasm Resources Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuxi, Jiangsu 214081; 2. Research Center of Saline-alkali Land Fishery Engineering Technology, Chinese Academy of Fishery Sciences, East China Sea Fisheries Research Institute, Wuxi, Jiangsu 214081)

**Abstract** In order to study the growth and development of benthonic animals, the density and biomass of benthonic animals were analyzed by using four nutrient media with different components, and the nutrient factors in water body were also studied. The results showed that there were three main benthonic species in the culture medium, namely Chironomid larvae, *Limnodrilus hoffmeisteri* and *Bellamyia quadrata*. The density order was molasses > humic acid > fertilizer > control group. The biomass was 2.996 6, 2.127 2, 2.148 9 and 0.957 6 g/m<sup>2</sup> respectively. Physical and chemical analysis was used to analyze and evaluate the nutrient factors in the water body. The content of NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N was the highest in the control group, reaching (0.041±0.002) mg/L. And the nutrient substances in the control group were few, which was not suitable for the growth of benthonic animals and aquatic organisms; TN and TP concentration were (1.455~2.493) and (0.391~0.667) mg/L. No circulation of the water in the medium results in water nutrition, and water silk worms were highly resistant to contamination. The density order of benthonic animals was the water silk worm > midge larva > snail lion. Correlation analysis between the density of benthonic animals in the medium and nutrient factors in water body and between the density of benthonic animals were conducted, there was no significant correlation between different benthonic animals. The nutrient factors in water body had a negative correlation with the density of Chironomid larvae and *L. hoffmeisteri* and little correlation with the density of *B. quadrata*. The correlation coefficient between TP and the density of benthonic animals was greater than that with total nitrogen. The research results could provide scientific basis for the growth of shrimp and crabs in the future.

**Key words** Culture medium; Benthonic animal; Community structure; Water quality evaluation

底栖动物是水生态系统中重要生物群落<sup>[1]</sup>, 同时也是水生态系统中重要组成成分<sup>[2]</sup>, 是重要的次级生产者<sup>[3]</sup>, 对生态系统中物质的循环和能量的流动具有决定性作用<sup>[4]</sup>。底栖动物可以分解和消耗沉积物中的有机质, 调节水-沉积物界面之间交换过程, 如吸附、溶解消耗、氧化还原、生物作用等, 并可以改善水体质量<sup>[5-7]</sup>。一般认为水体中营养因子含量的改变是因为外界环境因素造成的, 如温度、pH、DO、EC、水生生物的搅动等因素的影响<sup>[8-9]</sup>。当水质发生改变时, 水底中的底栖动物也会发生改变, 打破原有的生态平衡<sup>[10-11]</sup>。根据水体中底栖动物生物量的时空变化对水生态具有指示性作用, 进而对水域生态系统中水质进行评价<sup>[12-13]</sup>。通过对水生态系统底栖动物的时空变化情况, 可以得出湖泊、河流、

海洋等水体的变化规律, 更加准确地评价水体的质量<sup>[14-17]</sup>。目前, 根据底栖动物群落的变化对水生态系统及水质环境的评价已经普遍研究应用<sup>[18-19]</sup>。国内外学者对湖泊、海洋等水生态系统中营养因子的研究, 主要是各个水生态系统中营养因子的分布情况、水体富营养化的治理<sup>[20-25]</sup>及水体中营养因子的转变<sup>[26-27]</sup>, 但相同底栖动物群落, 不同成分类型的沉积物对水质的影响研究较少。水质生境的状况是虾蟹生长的重要基础<sup>[28]</sup>。

同时, 底栖动物也是湖泊生态系统中虾蟹的饵料, 根据饵料生物增殖和培养基施用情况, 探索影响饵料生物增殖的培养基中营养盐转化和吸收过程中关键微生物种群结构变化, 研究不同类型底栖饵料生物对底栖环境中营养物质循环变化及对养殖水体系统中营养盐去除的贡献率, 研究投放培养基对水体水质指标的影响, 分析和评价培养基施用后对养殖水体生态环境的影响效果, 旨在为利用投放培养基生产饵料生物进行虾蟹等水产养殖提供理论依据和技术支撑, 推动养殖技术进步和加快产业的转型与升级。

**基金项目** 江苏省海洋与渔业创新工程项目(Y2017-33); 中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2018HY-ZD0402)。

**作者简介** 朱光艳(1991—), 女, 吉林吉林人, 研究实习员, 硕士, 从事水环境生态及污染生态治理研究。\*通信作者, 副研究员, 博士, 从事水环境生态及污染生态治理研究。

**收稿日期** 2020-07-06

## 1 材料与方

**1.1 试验地概况** 培养基施用研究地点在淡水渔业研究中心基地(南泉),位于 119°33'~120°38'E,31°07'~32°02'N,隶属北亚热带湿润区,亚热带季风气候,四季分明,气候温和,日照充足,降水丰沛,雨热同季,无霜期长。平均气温 16.2℃,降水量 1 121.7 mm,雨天 123 d,雨季较长,主要集中在夏季。全年降水量大于蒸发量,属于湿润地区。日照时数 1 924.3 h,日照百分率 43%,全年无霜期 220 d 左右。

## 1.2 研究方法

**1.2.1 样品采集。**在研究中心设置 15 个塑料大桶,按照糖蜜、腐殖酸、肥料进行添加,研究对底栖饵料生物繁育的影响。每个处理 4 个平行样,并设置对照组。糖蜜含水率为 68%,40 g/桶(按照 1 m<sup>2</sup>/桶计算);腐殖酸 20 g/桶;肥料(生物肥料)150 g/桶;对照组(池塘底泥)。该验于 2018 年 5 月开始,到 2018 年 9 月结束。每个月取样 1 次,该试验的培养基放置于室外自然环境下,采集每个培养基中水样和底栖动物,采集完全后带回实验室做室内分析。

**1.2.2 样品测定。**主要测定样品铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、亚硝态氮(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N)、磷酸根(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)、总氮(TN)和总磷(TP)含量及底栖动物的密度及生物量,通过研究培养基中的水质,分析水体中营养因子及底栖动物的变化。所有指标采用紫外分光光度计测定。底栖动物采集用采泥器,泥样用 60 目尼龙网筛洗,余留物置于白瓷盘中,再

将底栖动物活体一一挑出。在实验室中鉴定样品中底栖动物的种类,并计算个数。

**1.2.3 数据分析。**采用 SPSS 21.0、Origin 2017 和 Excel 2013 软件对试验数据进行统计与分析。

## 2 结果与分析

**2.1 生长季中底栖动物的变化** 根据表 1 中底栖动物密度和生物量的比较,3 种不同类型的底栖动物密度从大到小依次为水丝蚓、摇蚊幼虫、螺狮。摇蚊幼虫在糖蜜中密度最大并且生长较快,8 月以后长成成虫飞离水面,在肥料中摇蚊幼虫生长周期最长,8、9 月密度也急剧下降,但生物量变大,腐殖酸中密度最少且主要集中在 5—7 月份,对照组只在 6、7 月中存活且生物量偏小。这说明摇蚊幼虫生长周期大约在 2~3 个月,摇蚊幼虫随着生长发育长成成虫离开底泥。

水丝蚓活动在整個生长周期中,密度从大到小依次为糖蜜、腐殖酸、肥料、对照组,在腐殖酸中水丝蚓的相对生物量最大,糖蜜中生长的较慢,水丝蚓主要生长周期为 2 个月左右,从 7 月份开始密度急剧下降,水温对水丝蚓的生长也有所影响,温度过高则会影响其存活率,但相对生物量逐渐变大,对照组中生长周期较短,数量相对较少。

螺狮生长周期覆盖整个生长季,且密度变化不大,说明螺狮的生长周期较长且稳定,同时外界温度等因素对其生长发育也有影响,最终会导致密度发生变化,温度过低时螺狮会进入休眠期不再摄食。

表 1 底栖动物密度及生物量的变化

Table 1 Changes of the density and biomass of benthonic animals

月份 Month	培养基 Medium	摇蚊幼虫 <i>Chironomid larva</i>		水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>		螺狮 <i>Bellamyia quadrata</i>	
		密度 Density ind/m <sup>2</sup>	生物量 Biomass g/m <sup>2</sup>	密度 Density ind/m <sup>2</sup>	生物量 Biomass g/m <sup>2</sup>	密度 Density ind/m <sup>2</sup>	生物量 Biomass g/m <sup>2</sup>
5	糖蜜	81	0.463 3	382	1.635 7	3	0.349 2
	腐殖酸	18	0.074 5	236	0.925 3	4	0.753 2
	肥料	21	0.152 3	291	1.042 2	4	1.097 3
	对照组	0	0	0	0	0	0
6	糖蜜	97	1.080 8	510	1.296 5	6	0.897 6
	腐殖酸	8	0.014 9	125	0.546 4	10	1.173 7
	肥料	27	0.356 6	33	0.100 1	0	0
	对照组	17	0.094 6	73	0.339 1	0	0
7	糖蜜	91	2.703 7	14	0.660 8	0	0
	腐殖酸	26	1.013 0	8	0.475 7	2	0.647 3
	肥料	28	0.802 6	4	0.183 4	8	1.569 2
	对照组	62	1.332 0	5	0.199 0	3	0.954 3
8	糖蜜	0	0	61	2.941 4	10	1.455 0
	腐殖酸	0	0	17	0.885 7	14	1.841 6
	肥料	3	0.172 9	20	1.133 3	5	0.942 1
	对照组	0	0	26	1.081 0	7	0.788 2
9	糖蜜	0	0	43	1.110 8	1	0.388 5
	腐殖酸	8	0.249 5	25	0.786 2	4	0.749 1
	肥料	1	0.252 1	27	0.883 8	5	2.056 7
	对照组	0	0	0	0	0	0

**2.2 底栖动物密度和生物量的时间变化** 从图 1 可以看出,不同成分培养基中底栖动物密度和生物量在生长季中都存在明显的变化。密度从大到小依次为糖蜜、腐殖酸、肥料、

对照组,7 月是底栖动物密度的一个分界点,7 月以后各成分的底栖动物密度趋于相同,主要因为摇蚊幼虫和水丝蚓的生长周期决定的,摇蚊幼虫在成虫之后飞离水面,水丝蚓的生

长周期只有 2~3 个月。生物量在生长季中变化较大,主要是因为底泥中螺狮生长周期较长,结合表 1 可以得出,腐殖酸和肥料中适宜螺狮的生长,随着月份的增加,生物量逐渐变

大;另外,部分残存在底泥中的水丝蚓生物量变大,最终导致不同肥料中生物量变化存在差异。对照组的生物量最小,糖蜜中底栖动物生物量随着月份的增加而逐渐减小。

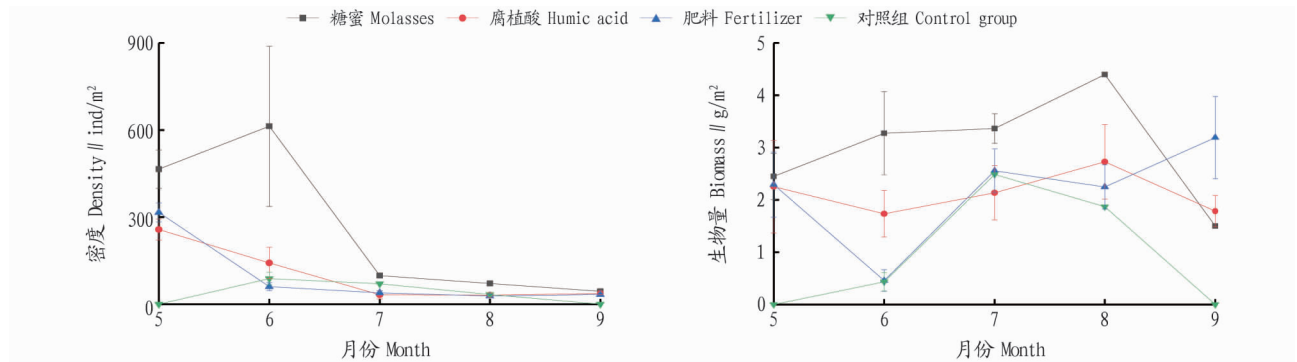


图 1 底栖动物密度和生物量的季节的变化

Fig. 1 Seasonal changes of the density and biomass of benthic animals

**2.3 水体中营养因子含量的变化** 由表 2 可知,对照组与前 3 个培养基中  $PO_4^{3-}-P$ 、TP、TN 含量均存在显著差异 ( $P < 0.05$ ),其余指标不存在显著差异。 $NH_4^+-N$  与 TN 含量的变化规律一致,从高到低依次为糖蜜、腐殖酸、肥料、对照组。 $NO_2^- -N$  含量从高到低依次为对照组、腐殖酸、糖蜜、肥料,由此可见对照组环境最不利于虾蟹生长; $NO_3^- -N$  含量从高到

低依次为腐殖酸、糖蜜、对照组、肥料,因为腐殖酸中有大量的动植物残骸,经微生物分解转化成含氮物质; $PO_4^{3-}-P$  含量从高到低依次为肥料、糖蜜、腐殖酸、对照组,TP 含量从高到低依次为腐殖酸、糖蜜、肥料、对照组,对照组中磷含量与其余 3 种营养成分含量有明显差异,结合表 1 中结果可知底栖动物生长需要磷元素。

表 2 不同培养基水体中营养因子含量的比较

Table 2 The nutrient factors content comparison in water body among different culture media

培养基 Medium	$NH_4^+-N$	$NO_2^- -N$	$NO_3^- -N$	$PO_4^{3-}-P$	TP	TN
糖蜜 Molasses	0.575±0.028	0.033±0.002	0.618±0.011	0.281±0.014 a	0.665±0.052 a	2.493±0.072 a
腐殖酸 Humic acid	0.546±0.022	0.034±0.002	0.632±0.013	0.280±0.031 a	0.667±0.034 a	2.364±0.078 a
肥料 Fertilizer	0.530±0.023	0.026±0.002	0.596±0.010	0.296±0.016 a	0.598±0.046 a	2.135±0.113 a
对照组 Control group	0.341±0.014	0.041±0.002	0.607±0.022	0.121±0.005 b	0.391±0.009 b	1.455±0.097 b

注:同列不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

Note: Different small letters in the same column indicated significant difference ( $P < 0.05$ )

**2.4 底栖动物密度与水体营养因子的关系** 由表 3~6 可知,4 种培养基中  $NH_4^+-N$  含量与 TN 含量呈显著正相关。在腐殖酸中,水丝蚓密度与 TP 含量呈显著负相关;摇蚊幼虫密度与  $PO_4^{3-}-P$  含量在肥料中呈显著负相关;对照组中螺狮

密度与  $NO_3^- -N$  含量呈显著正相关,TP 含量与  $NH_4^+-N$  含量呈正相关,TN 含量与  $PO_4^{3-}-P$  含量呈正相关。同时,对 3 种不同底栖动物密度间进行相关性分析,发现其相关性并不明显。

表 3 糖蜜中底栖动物的密度与水体中营养因子含量的相关关系

Table 3 Correlation coefficient between the density of benthic animals and nutrient factors content in water body in molasses

指标 Index	$NH_4^+-N$	$NO_2^- -N$	$NO_3^- -N$	$PO_4^{3-}-P$	TP	TN	摇蚊幼虫密度 Density of Chironomid larva	水丝蚓密度 Density of <i>L. hoffmeisteri</i>	螺狮密度 Density of <i>B. quadrata</i>
$NH_4^+-N$	1								
$NO_2^- -N$	-0.129	1							
$NO_3^- -N$	0.452	0.759	1						
$PO_4^{3-}-P$	0.341	0.558	0.876	1					
TP	0.241	0.121	0.432	0.785	1				
TN	0.928*	-0.406	0.204	0.254	0.391	1			
摇蚊幼虫密度 Density of Chironomid larva	-0.618	-0.383	-0.816	-0.643	-0.131	-0.367	1		
水丝蚓密度 Density of <i>L. hoffmeisteri</i>	-0.481	-0.030	-0.579	-0.839	-0.805	-0.533	0.597	1	
螺狮密度 Density of <i>B. quadrata</i>	0.717	-0.242	0.013	-0.326	-0.475	0.581	0.312	0.227	1

注: \* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

Note: \* indicated significant correlation at 0.05 level (bilateral)

表 4 腐殖酸中底栖动物的密度与水体中营养因子含量的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between the density of benthonic animals and nutrient factors content in water body in humic acids

指标 Index	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	TP	TN	摇蚊幼虫密度 Density of Chironomid larva	水丝蚓密度 Density of <i>L. hoffmeisteri</i>	螺狮密度 Density of <i>B. quadrata</i>
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	1								
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	0.246	1							
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	-0.140	0.038 8	1						
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	-0.017	-0.686	-0.449	1					
TP	0.646	0.861	0.219	-0.353	1				
TN	0.955*	0.076	-0.054	0.196	0.541	1			
摇蚊幼虫密度 Density of Chirono- mid larva	-0.646	0.483	0.281	-0.184	0.151	-0.678	1		
水丝蚓密度 Density of <i>L. hoffmeis- teri</i>	-0.853	-0.606	0.127	0.097	-0.908*	-0.757	0.167	1	
螺狮密度 Density of <i>B. quadrata</i>	0.582	-0.217	0.260	-0.153	-0.006	0.631	-0.848	-0.115	1

注: \* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

Note: \* indicated significant correlation at 0.05 level (bilateral)

表 5 肥料中底栖动物的密度与水体中营养因子含量的相关系数

Table 5 Correlation coefficient between the density of benthos and nutrient factors content in water body in fertilizer

指标 Index	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	TP	TN	摇蚊幼虫密度 Density of Chironomid larva	水丝蚓密度 Density of <i>L. hoffmeisteri</i>	螺狮密度 Density of <i>B. quadrata</i>
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	1								
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	-0.272	1							
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	0.478	-0.626	1						
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	0.658	-0.257	-0.154	1					
TP	-0.560	-0.563	0.364	-0.532	1				
TN	0.930*	-0.220	0.683	0.335	-0.429	1			
摇蚊幼虫密度 Density of Chirono- mid larva	-0.756	0.124	0.144	-0.950*	0.715	-0.473	1		
水丝蚓密度 Density of <i>L. hoffmeis- teri</i>	-0.573	-0.279	-0.366	0.098	0.556	-0.749	0.187	1	
螺狮密度 Density of <i>B. quadrata</i>	0.315	-0.806	0.568	0.109	0.328	0.323	-0.159	-0.159	1

注: \* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

Note: \* indicated significant correlation at 0.05 level (bilateral)

表 6 对照组中底栖动物的密度与水体中营养因子含量的相关系数

Table 6 Correlation between the density of benthonic animals and nutrient factors content in water body in control group

指标 Index	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	TP	TN	摇蚊幼虫密度 Density of Chironomid larva	水丝蚓密度 Density of <i>L. hoffmeisteri</i>	螺狮密度 Density of <i>B. quadrata</i>
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	1								
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	0.597	1							
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	-0.026	-0.209	1						
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	0.875	0.761	-0.281	1					
TP	0.922*	0.677	0.234	0.854	1				
TN	0.923*	0.800	-0.317	0.935*	0.827	1			
摇蚊幼虫密度 Density of Chirono- mid larva	-0.230	0.124	0.547	-0.009	0.153	-0.271	1		
水丝蚓密度 Density of <i>L. hoffmeis- teri</i>	-0.519	0.130	0.025	-0.530	-0.461	-0.327	-0.028	1	
螺狮密度 Density of <i>B. quadrata</i>	0.131	-0.334	0.879*	-0.298	0.219	-0.207	0.085	-0.024	1

注: \* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

Note: \* indicated significant correlation at 0.05 level (bilateral)

### 3 讨论

由于底栖动物生长发育都在水体底部,水质环境直接影响其存活率,从而影响群落结构组成和密度变化,也因底栖动物的特殊生态特征,它可以间接反映和监测水生态环境。

通过研究 4 种不同成分的培养基上底栖动物的种类和密度来看,主要有 3 种,分别为摇蚊幼虫、水丝蚓与螺狮。在相同月份中,水丝蚓和摇蚊幼虫的密度远高于螺狮,表明在水体中优势种为水丝蚓与摇蚊幼虫,这 2 种底栖动物也是虾蟹生

长发育的饵料。随着时间的推移,底栖动物的密度逐渐下降,糖蜜中底栖动物密度为 $44\sim 613\text{ ind/m}^2$ ;对照组中底栖动物密度为 $0\sim 88\text{ ind/m}^2$ 。7月后底栖动物的密度趋于稳定;底栖动物的生物量随着月份的变化而变化,5月和9月份的生物量基本持平,水底中摇蚊幼虫和水丝蚓的密度较低,摇蚊幼虫和水丝蚓的生长周期较短<sup>[29-30]</sup>,而螺狮的生长周期最长,随着月份的增加生物量也增加。

4种不同培养基中底栖动物的群落结构差异较大,且糖蜜、腐殖酸和肥料中水体营养因子含量远高于对照组,TN、TP含量分别为 $1.455\sim 2.493$ 和 $0.391\sim 0.665\text{ mg/L}$ ,属于营养化水体,主要原因是在塑料桶内水体不流通,底栖动物活动频繁造成水体中营养因子含量偏高,物种结构单一,优势种突出,优势种为耐污能力强的水丝蚓与摇蚊幼虫。对照组 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 含量为 $(0.041\pm 0.002)\text{ mg/L}$ ,水体中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 含量过高则会影响水生生物的生长发育,这也造成对照组中的底栖动物较其余3种培养基数量较少的原因。

进一步探讨4种不同成分培养基中底栖动物与水体中营养因子含量的相关性以及不同种类的底栖动物之密度间的相关性,得出了底栖动物密度间及其与TN、TP、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 含量之间的矩阵关系表。该试验结果表明,不同成分的水体对摇蚊幼虫生长发育的影响显著,糖蜜中水体营养因子含量与摇蚊幼虫和水丝蚓的密度都呈负相关,其中 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 含量与TP含量与水丝蚓密度的相关系数较大,分别为 $-0.839$ 和 $-0.805$ ,而TP含量与螺狮密度呈负相关;腐殖酸中TP含量与水丝蚓密度呈显著负相关(相关系数为 $-0.908$ ),TN和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量与摇蚊幼虫、水丝蚓的密度呈负相关,分别为 $-0.678$ 、 $-0.646$ 、 $-0.7575$ 和 $-0.853$ ,水体中TP含量与螺狮密度呈负相关;肥料中 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 含量与摇蚊幼虫密度呈显著负相关(相关系数为 $-0.950$ ),TP含量与3种培养基中底栖动物密度均呈正相关,TN和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量与摇蚊幼虫和水丝蚓的密度呈负相关,相关系数分别为 $-0.473$ 、 $-0.756$ 、 $-0.749$ 和 $-0.573$ ,与螺狮密度呈正相关,但相关性不显著;对照组中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量与螺狮密度呈显著正相关(相关系数 $0.879$ ),其余相关性不明显。综上所述,与TN相比,TP对底栖动物生长发育的影响较大,这与相关学者研究结果<sup>[16,31]</sup>相一致。水体中TN与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 呈显著正相关,因为底栖动物的代谢快,排泄物多,氮元素通过矿化和氨化作用产生大量的铵根离子,这与曾涛<sup>[32]</sup>研究结果相同。不同成分的营养物质对底栖动物的生长繁育有较大的影响。

#### 4 结论

摇蚊幼虫与水丝蚓的活动周期较短(2~3个月),而螺狮的生长周期较长。对照组水体中营养因子含量最低,底栖动物的密度也最小,水体中营养因子含量与底栖动物的生长发育间相关性较大,并且TP含量对底栖动物的影响大于TN含量。

#### 参考文献

[1] 陈振楼,刘杰,许世远,等.大型底栖动物对长江口潮滩沉积物-水界面

- 无机氮交换的影响[J].环境科学,2005,26(6):43-50.
- [2] 许静波,张加雪,徐明,等.大纵湖大型底栖生物群落结构及水质生物学评价[J].人民长江,2019,50(1):24-28.
- [3] 马雅雪,姚维林,袁赛波,等.长江干流宜昌-安庆段大型底栖动物群落结构及环境分析[J].水生生物学报,2019,43(3):634-642.
- [4] COVICH A P, PALMER M A, CROWL T A. The role of benthic invertebrate species in freshwater ecosystems; Zoobenthic species influence energy flows and nutrient cycling[J]. BioScience, 1999, 49(2): 119-127.
- [5] LINDEGAARD C. The role of zoobenthos in energy flow in two shallow lakes[J]. Hydrobiologia, 1994, 275/276(1): 313-322.
- [6] VANNI M J. Nutrient cycling by animals in freshwater ecosystems[J]. Annual review of ecology and systematics, 2002, 33(1): 341-370.
- [7] JUSTON J M, DEBUSK T A, GRACE K A, et al. A model of phosphorus cycling to explore the role of biomass turnover in submerged aquatic vegetation wetlands for Everglades restoration[J]. Ecological modelling, 2013, 251(1): 135-149.
- [8] CHEN M S, DING S M, ZHANG L P, et al. An investigation of the effects of elevated phosphorus in water on the release of heavy metals in sediments at a high resolution[J]. Science of the total environment, 2017, 575(1): 330-337.
- [9] 张晋华,于立霞,姚庆祯,等.不同季节辽河口营养盐的河口混合行为[J].环境科学,2014,35(2):569-576.
- [10] 王丽珍,刘永定,陈亮,等.滇池底栖无脊椎动物群落结构及水质评价[J].水生生物学报,2007,31(4):590-593.
- [11] 马宝珊,徐滨,魏开金,等.安宁河中游底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J].水生生物学报,2019,43(3):643-653.
- [12] 闫云君,李晓宇,梁彦龄.草型湖泊和藻型湖泊中大型底栖动物群落结构的比较[J].湖泊科学,2005,17(2):176-182.
- [13] 熊飞,李文朝,潘继征.高原深水湖泊抚仙湖大型底栖动物群落结构及多样性[J].生物多样性,2008,16(3):288-297.
- [14] 黄旭蕾,李天宏,蒋晓辉.基于大型底栖无脊椎动物指数的黄河水质评价研究[J].北京大学学报(自然科学版),2015,51(3):553-561.
- [15] 王琴,王海军,崔永德.武汉东湖水网区底栖动物群落特征及其水质的生物学评价[J].水生生物学报,2010,34(4):739-746.
- [16] 吕光俊,熊邦喜,刘敏,等.不同营养类型水库大型底栖动物的群落结构特征及其水质评价[J].生态学报,2009,29(10):5339-5349.
- [17] 李永刚,胡庆杰,曲疆奇,等.北京密云水库底栖动物群落结构及其时空变化[J].水生态学杂志,2018,39(5):31-38.
- [18] 王银东,熊邦喜,杨学芬.武汉市南湖北大型底栖动物的群落结构[J].湖泊科学,2005,17(4):327-333.
- [19] 闫云君,李晓宇.汉江流域上游支流大型底栖动物群落结构特征与生物多样性[J].湖泊科学,2007,19(5):585-591.
- [20] 张晋华,于立霞,姚庆祯,等.不同季节辽河口营养盐的河口混合行为[J].环境科学,2014,35(2):569-576.
- [21] 叶翔,陈坚,暨卫东,等.闽江口营养盐生物地球化学过程研究[J].环境科学,2011,32(2):375-383.
- [22] 全为民,沈新强,韩金娣,等.长江口及邻近水域氮、磷的形态特征及分布研究[J].海洋科学,2010,34(3):76-81.
- [23] 颜秀丽,翟惟东,洪华生,等.九龙江口营养盐的分布、通量及其年代际变化[J].科学通报,2012,57(17):1578-1590.
- [24] 张景平,黄小平,江志坚,等.2006—2007年珠江口富营养化水平的季节性变化及其与环境因子的关系[J].海洋学报:中文版,2009,31(3):113-120.
- [25] 李斌,白艳艳,邢红艳,等.四十里湾营养状况与浮游植物生态特征[J].生态学报,2013,33(1):260-266.
- [26] CHEN N W, HONG H S. Integrated management of nutrients from the watershed to coast in the subtropical region[J]. Current opinion in environmental sustainability, 2012, 4(2): 233-242.
- [27] 姜德娟,毕晓丽.流域-河口-近海系统氮、磷营养盐输移研究综述[J].水科学进展,2010,21(3):421-429.
- [28] 刘宁,王新新,封腾望,等.关于影响虾类养殖水体主要指标的分析方案[J].南方农机,2018,49(13):101.
- [29] 王雪龙,陈再忠,高建忠,等.人工饲养背摇蚊幼虫龄数和龄期的测定[J].环境昆虫学报,2015,37(6):1263-1271.
- [30] 季东升.水丝蚓人工养殖技术[J].农村百事通,2015(9):43-44.
- [31] 陈其羽,梁彦龄,吴天惠.武汉东湖底栖动物群落结构和动态的研究[J].水生生物学集刊,1980,7(1):41-56.
- [32] 曾涛.樟湖库湾网箱养殖区沉积物氮的时空变化特征[J].渔业研究,2018,40(1):53-59.