

杭州西湖底栖动物群落结构及其水质生物学评价*

姚思鹏^{1,2} 饶利华^{1,2} 徐 骏^{1,2} 张 巍^{1,2} 杨 俊^{1,2} 陈 鏊^{1,2}
丁秀颖^{1,2} 蔡婷婷^{1,2} 吴芝瑛^{1,2#}

(1.杭州市西湖水域管理处,浙江 杭州 310002;2.杭州西湖风景名胜区环境监测站,浙江 杭州 310008)

摘要 2017年对西湖9个点位的底栖动物进行季度调查,共采集到3门7纲25种底栖动物。底栖动物年均密度为280.3个/m²,主要类别为水生昆虫、寡毛类、软体动物,优势种为羽摇蚊(*Chironomus plumosus*)和圆田螺(*Cipangopaludina*)。空间分布上,不同湖区的底栖动物组成存在不同,在主湖区(少年宫、外湖心)底栖动物主要为水生昆虫,摇蚊幼虫为绝对优势种,而湖西区(西里湖、茅家埠、金沙港、乌龟潭、浴鹄湾)底栖动物主要为软体动物。季节变化上,底栖动物密度分布为冬季>秋季>夏季>春季。寡毛类全年采样出现频次较低,作为耐污染种,这表明西湖水环境质量变好。西湖的Shannon-Wiener生物多样性指数(H')年均值为1.27,西湖水质为轻污染,其中茅家埠、金沙港和乌龟潭点位 H' 较高,与所在湖区生长大量沉水植物,生境更加稳定有关。 H' 与加权营养状态指数($TLI(\Sigma)$)在对西湖个别点位水质评价结果上存在差异,鉴于西湖底栖动物生境易受外界影响导致群落波动较大,因此认为 $TLI(\Sigma)$ 的评价结果更为准确。

关键词 底栖动物 西湖 群落结构 多样性 加权营养状态指数

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2019.07.014

Zoobenthos community structure and bio-assessment of water quality in West Lake, Hangzhou, China YAO Sipeng^{1,2}, RAO Lihua^{1,2}, XU Jun^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, YANG Jun^{1,2}, CHEN Jun^{1,2}, DING Xiuying^{1,2}, CAI Tingting^{1,2}, WU Zhiying^{1,2}. (1. Hangzhou West Lake Water Administration, Hangzhou Zhejiang 310002; 2. Hangzhou West Lake Scenic Spots Environmental Monitoring Station, Hangzhou Zhejiang 310008)

Abstract: The zoobenthos in West Lake were seasonally sampled at 9 sites from January to October in 2017. In total, 25 taxa were collected, with the annual average density was 280.3 individual per square meters. The collected zoobenthos were mainly aquatic insects, Oligochaeta and mollusks, and the dominant species were *Chironomus plumosus* and *Cipangopaludina*. In the spatial distribution, the taxa composition of zoobenthos was different in different areas of West Lake. In the main lake area (Shaoniangong and outer lake center sites), the main zoobenthos were aquatic insects, well in western area of West Lake (Xilihu, Maojiabu, Jinshagang, Wuguitan, Yuhuwan sites), the dominant species were mollusks. In temporal distribution, the density of zoobenthos presented the tendency of winter>autumn>summer>spring. The Oligochaeta, which tolerate the organic pollution and low dissolved oxygen, had low density all through the year, which indicated that the water quality in West Lake was getting better. The annual average Shannon-Wiener index of West Lake (H') was 1.27, showed the West Lake was lightly polluted, the H' was higher in Maojiabu, Jinshagang and Wuguitan, because large amount of submerged plants growth there, and the habitat was more stable. As for the West Lake aquatic environment assessment, the evaluation result base on H' and weighted nutritional status index ($TLI(\Sigma)$) was different in several sites, in view of the fact that community structures of zoobenthos were sensitive to the water conditions and always presented big fluctuation, so the $TLI(\Sigma)$ -based evaluation result was more accurate.

Keywords: zoobenthos; West Lake; community structure; diversity; weighted nutritional status index

西湖位于杭州市区西面,湖面面积约6.5 km²,平均水深2.5 m。作为著名的城市风景湖泊,西湖先后实施了底泥生态疏浚工程、西湖引配水工程和湖西综合保护工程和以恢复沉水植物为主的生态修复工程等,以求改善西湖水质、提升杭州旅游资源质量。

底栖动物是生活在水体底层、沉积物表面以及附生在水生植物上的各种无脊椎动物的总称。大型底栖动物在水体生态系统中的作用有很多,如加速水底碎屑的分解、参与泥水界面的物质交换和水体的自净,最终实现水体生态系统的物质循环和能量

第一作者:姚思鹏,男,1984年生,硕士,工程师,主要从事水环境监测及浅水湖泊生态修复研究。# 通讯作者。

* 杭州西湖风景名胜区管理委员会资助项目 (No.2016-009)。

流动^[1-2]。底栖动物与生存环境是统一的整体,水体环境质量对底栖动物的生长、繁殖和种类分布有很大影响,底栖动物对污染状况会有应激反应,由此引起的种群变化特征是很好的水环境评价指标,可以用于评价水环境质量^[3]。研究底栖动物不同季节不同点位的种类组成,并据此得出底栖动物的群落结构变化情况,对湖泊资源合理利用,湖泊水质改善意义重大。一直以来,针对西湖底栖动物的研究并不多,俞大维等^[4]对西湖及三潭内塘的底栖动物群落结构进行了调查;虞左明等^[5]比较了引水前后西湖小南湖湖区的底栖动物变化情况;吴洁等^[6]对西湖大型底栖无脊椎动物进行了连续监测,并通过调查底栖动物组成情况评价了西湖和青山水库的富营养化程度^[7]。上述调查均是在20世纪90年代完成,近20年来西湖先后采取多项工程措施来改善西湖水质^[8],对西湖的水环境和底质环境产生较大影响,环境条件的变化会影响底栖动物的生长及种类组成,近年来关于西湖底栖动物的组成情况鲜有文章报道,因此,本研究对西湖的底栖动物情况进行现状调查,以期对西湖的水环境保护和综合治理积累资料。

1 材料与方法

1.1 采样时间和采样点的设置

根据西湖的湖区形状和生境特点,设置了少年宫、外湖心、北里湖、西里湖、浴鹄湾、乌龟潭、茅家埠、金沙港、小南湖共9个采样点位(见图1),分别



1—少年宫;2—外湖心;3—北里湖;4—西里湖;5—茅家埠;
6—金沙港;7—乌龟潭;8—浴鹄湾;9—小南湖

图1 西湖采样点分布

Fig.1 Sampling sites in the West Lake

于2017年1月(冬季)、4月(春季)、7月(夏季)、10月(秋季)对西湖底栖动物进行季度调查。

1.2 样品采集与处理

使用改良的彼得生采泥器($1/16\text{ m}^2$)对底泥样品进行采集,用40目尼龙网对泥样反复筛洗直至出水清澈,将网筛中的残余物倒在白磁盘中,逐一挑出残余物中的底栖动物活体,对挑出的底栖动物进行种类鉴定和个体计数,并将结果折算成单位面积的密度和生物量。一部分泥样冷冻保存用于沉积物叶绿素a(Chl-a)及有机质的测定。

表层水样的透明度(SD)、水温、溶解氧等项目现场测定,水样高锰酸盐指数、TN、TP和Chl-a等项目参考文献[9]、文献[10]中的方法进行测定。

称取一定量解冻后的底泥样品,于室内风干至恒重,计算含水率。称取0.5 g左右研磨好的风干底泥样品放入10 mL具塞离心管中,加入90%(体积分数,下同)丙酮溶液5 mL,于4℃黑暗条件下静置24 h,然后以4 000 r/min的转速离心5 min,上清液转移至10 mL容量瓶中,再向10 mL具塞离心管中添加90%丙酮2~3 mL,离心取上清液,将两次上清液合并,定容至10 mL,测定Chl-a含量,底泥样品有机质含量的测定参照文献[11]。

1.3 数据分析

根据底栖动物的密度,利用PRIMER 5.0分析软件^[12]计算得到Shannon-Wiener物种多样性指数(H')。用水样SD、高锰酸盐指数、TN、TP和Chl-a等计算西湖水质的加权营养状态指数($TLI(\Sigma)$)^[13]。

2 结果与分析

2.1 西湖底栖动物群落结构

2.1.1 种类组成

36个底泥样品中共采集底栖动物25种,分属于3个门7个纲(见表1),其中花纹前突摇蚊出现频率最高,为63.89%,菱跗摇蚊和圆田螺出现频率也接近50%,软体动物中的铜锈环棱螺出现频率超过30%。其中,节肢动物门的羽摇蚊为优势种,其次为软体动物门的圆田螺。底栖动物年均密度为280.3个/ m^2 ,主要类别为水生昆虫(昆虫纲)、寡毛类(寡毛纲)、软体动物(腹足纲和瓣鳃纲),年均密度分别为129.8、27.6、108.5个/ m^2 ,3类底栖动物的密度占比分别为46.3%、9.9%、38.7%,合计高达近95%,可以代表西湖底栖动物分布情况,因此在底栖动物空间分布与季节变化研究中仅对这3类动物进行统计分析。

2.1.2 底栖动物空间分布

对不同采样点位底栖动物密度(4次采样平均

表 1 西湖底栖动物名录
Table 1 Taxa of zoobenthos found in West Lake

门	纲	物种	拉丁名
节肢动物门	昆虫纲	菱附摇蚊	<i>Clinotanytus</i> sp.
		隐摇蚊	<i>Cryptochironomus</i> sp.
		花纹前突摇蚊	<i>Procladius</i> sp.
		羽摇蚊	<i>Chironomus plumosus</i>
		长跗摇蚊	<i>Tanytarsus</i> sp.
		箭蜓科稚虫	<i>Gomphidae</i>
	甲壳纲	沼虾	<i>Macrobrachium</i>
环节动物门	寡毛纲	水丝蚓	<i>Limnodrilus</i>
		尾鳃蚓	<i>Branchiura sowerbyi</i>
		颤蚓	<i>Tubifex</i>
	多毛纲	疣吻沙蚕	<i>Tylorrhynchus</i>
		齿吻沙蚕	<i>Nephtyidae</i>
	蛭纲	水蛭	<i>Hirudinidae</i>
软体动物门	腹足纲	河蚬	<i>Corbicula fluminea</i>
		铜锈环棱螺	<i>Bellamya</i>
		圆田螺	<i>Cipangopaludina</i>
		耳萝卜螺	<i>Radix auricularia</i>
		方格矩沟蜷	<i>Semisulcospira cancellata</i>
		静水椎实螺	<i>Lymnaea stagnalis</i>
		矛形楔蚌	<i>Cuneopsis celtiformis</i>
	瓣鳃纲	褶纹冠蚌	<i>Cristaria plicata</i>
		矛蚌	<i>Lancvolaria</i>
		丽蚌	<i>Lamprotula</i> sp.
		背角无齿蚌	<i>Anodonta woodiana</i>
		三角帆蚌	<i>Hyriopsis cuningii</i>

值)进行统计,结果见图 2。从图 2 可以看出,少年宫点位底栖动物密度最高,金沙港点位次之,底栖动物密度最低的点位为小南湖。整个西湖主湖区(少年宫、外湖心)与湖西区域(西里湖、茅家埠、金沙港、乌龟潭、浴鹄湾)底栖动物组成存在不同,在西湖主湖区底栖动物主要为水生昆虫,摇蚊幼虫为绝对优势种,而湖西区域底栖动物主要为软体动物,除乌龟潭点位外,其他 4 个点位软体动物的密度占比均超

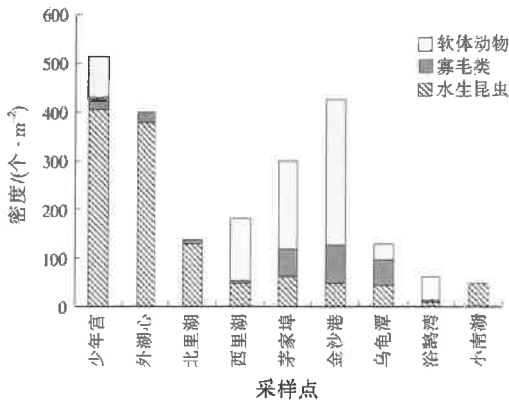


图 2 不同点位底栖动物密度
Fig.2 The density of zoobenthos in different sampling sites

过 50%，寡毛类在整个西湖区域数量都不多。
2.1.3 底栖动物季节变化

对西湖不同季节的底栖动物密度(湖区 9 个采样点平均值)进行统计,结果见图 3。总体看来,西湖底栖动物密度以冬季最高,秋季次之,春季最低。冬季水生昆虫密度高达 314.7 个/m²,显著多于其他季节($P<0.01$),其中优势种为水生昆虫的花纹前突摇蚊和菱附摇蚊,分别占底栖动物总密度的 27.1%、22.4%。值得说明的是,西湖夏季底栖动物密度虽然比春季高,但北里湖和浴鹄湾点位的密度

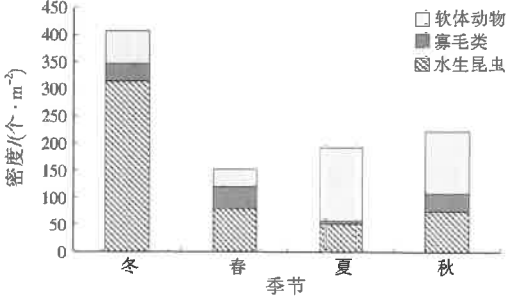


图 3 不同季节西湖底栖动物密度
Fig.3 The density of zoobenthos in West Lake in different season

为零,可见夏季不同点位的底栖动物分布差异最大。

4次采样中各类底栖动物的密度占比统计结果见表2。从表2可以看出,水生昆虫在春季和冬季为密度优势类群,占底栖动物总密度的50%以上;夏季、秋季软体动物为密度优势类群,占底栖动物总密度的50%以上,而寡毛类在各个季节占比均不高。

表2 4次采样各类底栖动物密度占比
Table 2 The density percentage of different taxa in different season

季节	类别	密度占比/%
冬季	水生昆虫	75.3
	寡毛类	8.0
	软体动物	14.5
春季	水生昆虫	51.7
	寡毛类	25.3
	软体动物	20.7
夏季	水生昆虫	25.5
	寡毛类	4.0
	软体动物	69.1
秋季	水生昆虫	32.6
	寡毛类	14.0
	软体动物	50.4

2.1.4 西湖底栖动物多样性分析

一般地,认为 $H' > 2$ 时水质为清洁; $1 < H' \leq 2$ 时为轻污染; $0 < H' \leq 1$ 时为重污染^[14]。根据上述标准,对西湖不同季节各采样点水质进行评价,结果见表3。可以看出, H' 最大值出现在冬季的茅家埠,为2.25, H' 最小值出现在秋季的小南湖,为0.56,西湖大部分点位的水质为轻污染,而浴鹄湾和小南湖采集到的底栖动物种类及数量都较少,多样性低,可能与这两个点位附近布设着西湖引水口有关;茅家埠、乌龟潭、金沙港点位采集到底栖动物种类较多,各类底栖动物分布均匀,底栖动物生物多样性较高,可能与所在湖区生长大量沉水植物有关,生境更加稳定。 H' 平均值呈现冬季>夏季>春季>

秋季的规律,除秋季 H' 平均值 < 1 外,其他3个季节 H' 均大于1,因此秋季西湖重污染点位相对最多。西湖年均 H' 为1.27,生物多样性指数不高,水质为轻污染。

2.2 底栖动物群落结构与水体环境因子的关系

根据西湖底栖动物的时空分布及环境因子的状况,对西湖底栖动物群落结构指标与环境因子间的相关性进行了分析(见表4)。西湖底栖动物密度与沉积物有机质及Chl-a呈显著负相关关系($P < 0.05$),与 H' 呈显著正相关关系($P < 0.05$),与其他环境因子并未表现出显著相关性($P > 0.05$); H' 与水体TN呈显著正相关关系($P < 0.05$),与其他环境因子相关关系不显著($P > 0.05$)。

3 讨论

近20年来,杭州西湖持续推进包括引水、清淤、恢复沉水植物为主的生态修复工程,西湖水体、泥-水界面、底质生境等发生较大变化,同时西湖部分湖区沉水植物逐步恢复,这些环境条件的变化将会影响西湖底栖动物的组成。此次年度调查中,西湖共检出底栖动物25种,优势种为羽摇蚊和圆田螺,而俞大维等^{[4]69}在1991年的调查中底栖动物优势种为水丝蚓,软体动物还相当贫乏,可见20世纪90年代西湖富营养化程度还很严重,而当前西湖底栖动物群落演替明显,西湖水质有一定程度的改善。目前少年宫、外湖心、北里湖点位底栖动物种类少,生物多样性低,基本都是摇蚊幼虫和寡毛类水蚯蚓,这与该湖区生境简单有关,该湖区属于少有沉水植物生长的中富营养的藻型湖区,生境相对单一,营养程度较高,温度适宜时浮游植物密度较高所致。在湖西区域底栖动物 H' 多分布在1~2,茅家埠、金沙港、乌龟潭等点位由于沉水植物群落逐步恢复,

表3 基于 H' 的水质评价结果¹⁾
Table 3 The H' -based water quality assessment results

季节	项目	采样点									平均
		少年宫	外湖心	北里湖	西里湖	茅家埠	金沙港	乌龟潭	浴鹄湾	小南湖	
冬季	H'	1.68	1.42	1.28	1.84	2.25	1.25	1.53	0.74	1.55	1.52
	污染程度	轻污染	轻污染	轻污染	轻污染	清洁	轻污染	轻污染	重污染	轻污染	轻污染
春季	H'	1.10	1.34	1.37	0.97	1.67	1.69	1.01	1.04	1.04	1.25
	污染程度	轻污染	轻污染	轻污染	重污染	轻污染	轻污染	轻污染	轻污染	轻污染	轻污染
夏季	H'	1.44	0.93	—	0.99	1.70	1.36	1.56	—	—	1.33
	污染程度	轻污染	重污染	—	重污染	轻污染	轻污染	轻污染	—	—	轻污染
秋季	H'	0.69	1.24	—	0.68	1.46	1.34	1.33	0.64	0.56	0.99
	污染程度	重污染	轻污染	—	重污染	轻污染	轻污染	轻污染	重污染	重污染	重污染

注:1)“—”表示由于采样点位未采集或仅采集1种底栖动物,无法对 H' 进行赋值计算

表4 水体环境因子与底栖动物群落结构指标的相关性分析结果¹⁾
Table 4 The correlation analysis between environmental factors of water and indexes of zoobenthos community structure

项目	密度	TN	TP	高锰酸盐指数	水质Chl-a	TLI(Σ)	有机质	沉积物Chl-a	H'
密度	1.000								
TN	0.032	1.000							
TP	-0.148	0.014	1.000						
高锰酸盐指数	-0.100	-0.629 *	0.514 *	1.000					
水质Chl-a	0.090	-0.675 *	0.380 *	0.754 *	1.000				
TLI(Σ)	0.102	-0.463 *	0.646 *	0.907 *	0.783 *	1.000			
有机质	-0.385 *	-0.019	-0.026	-0.031	-0.187	-0.175	1.000		
沉积物Chl-a	-0.359 *	0.283	0.027	-0.366 *	-0.365 *	-0.479 *	0.172	1.000	
H'	0.406 *	0.388 *	-0.322	-0.251	-0.089	-0.080	-0.310	-0.259	1.000

注: ¹⁾ * * 表示在 0.01 水平(双侧)上极显著相关; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关;样本数为 36。

所在湖区软体动物种类相对多,这是由于以沉水植物为主的水生高等植物为底栖动物提供了复杂多变的生境,不仅为大型底栖动物提供了良好的栖息场和繁殖场^[15],也可以降低底栖动物被天敌生物侵袭的几率。本次调查并未对西湖水生植物状况进行调查,因此西湖底栖动物群落结构与水生植物的详细关系还有待进一步研究。

此外,本次采样中寡毛类出现的频率较低,而吴洁等^[6]在 1995—1997 年对西湖的底栖动物进行调查中寡毛类水蚯蚓是密度优势种。在水生态学上,通常认为水丝蚓和颤蚓能耐低氧耐污染,喜好生活在有机质丰富的底质中^[16];龚志军等^[17]在东湖、熊金林等^[18]在湖北 4 个不同富营养化程度湖泊的底栖动物组成调研中发现,随着水体营养水平的提升,寡毛类密度会显著增加;姜苹红等^[19]认为汉阳湖寡毛类颤蚓科密度会随着水体 TN、TP、Chl-a 含量的增加而极显著增加;而张敏等^[20]对丹江口水库大型底栖动物的调查也发现,水质相对较好的丹江库区颤蚓科密度更低。当前西湖水栖寡毛类密度为 27.6 个/m²,远低于俞大维等^[4]1991 年调查的 355.6 个/m²和吴洁等^[6]于 1995—1996 年调查的 248~1 516 个/m²,这些耐污染种类的减少表明持续推进的西湖综合保护工程对改善西湖水质是有积极作用的。

在对整个西湖水环境质量评价结果上,基于 H' 和 TLI(Σ) 所得到的结论基本一致,即西湖水体总体处于中营养轻污染状态。但具体到不同湖区,评价结果存在差异,个别采样点位在某些季节中 H' 大幅降低,因此评价结果显示水体呈重污染状态,而同期 TLI(Σ) 评价则为中营养状态,董贯仓等^[21]在 2010 年对南四湖底栖动物群落结构特征的研究中也出现相似的情况。分析原因,西湖水源补给主要来自大规模的钱塘江引水,基本每月换水 1

次,同时西湖会不定期定点清淤和收割水草,这些外界干扰均会使西湖底栖动物的生活环境发生变化,从而引起底栖动物的种类和数量发生变化,因此用底栖动物 H' 来评价西湖水质状况可能与实际状况存在一定的偏差,而通过频繁的监测 TN、TP 等水体理化指标和计算获取的 TLI(Σ) 更能准确反映西湖不同季节不同湖区的水质状况。

4 结 论

(1) 于 2017 年 1 月、4 月、7 月、10 月对西湖 9 个点位的底栖动物进行季度调查,36 个底泥样品中共发现底栖动物 25 种,分属于 3 门 7 纲,底栖动物年均密度为 280.3 个/m²,主要类别为水生昆虫、寡毛类、软体动物,3 类底栖动物密度占比接近 95%,优势种为羽摇蚊和圆田螺。

(2) 空间分布上,不同湖区的底栖动物组成存在不同,在主湖区底栖动物主要为水生昆虫,摇蚊幼虫为绝对优势种,而湖西区域底栖动物主要为软体动物。季节变化上,底栖动物密度分布为冬季>秋季>夏季>春季。寡毛类在整个西湖数量都不多,全年采样中出现频次较低,预示着西湖水环境质量变好。

(3) 西湖年均 H' 为 1.27,生物多样性指数不高,水质为轻污染。H' 平均值呈现冬季>夏季>春季>秋季的规律,除秋季 H' 平均值<1 外,其他 3 个季节 H' 均大于 1,秋季西湖重污染点位相对最多。各点位中,西湖茅家埠、金沙港和乌龟潭 H' 较高,与所在湖区生长大量沉水植物,生境更加稳定有关。

(4) H' 和 TLI(Σ) 在对西湖个别点位水质评价的结论上存在差异,鉴于西湖底栖动物生境易受外界影响导致群落波动较大,因此 TLI(Σ) 评价结果更为准确。

(下转第 819 页)