

太湖流域春季底栖动物群落结构特征及水质评价

陈丽平¹, 高欣², 牛翠娟², 何培民¹, 刘其根¹, 孙月娟¹, 胡忠军^{1*}

(1. 上海海洋大学农业部淡水水产种质资源重点实验室, 上海 201306;

2. 北京师范大学生物多样性与生态工程教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要: 2010 年春季对太湖流域 14 个湖泊、7 座水库及 8 条河流的底栖动物进行了调查。共调查到底栖动物 57 种, 隶属 4 门、8 纲, 其中水生昆虫 (17 种) 和寡毛类 (15 种) 物种数最多。霍甫水丝蚓为整个流域的绝对优势种。聚类分析表明, 可将 29 个水体的底栖动物划分为 10 种群落类型, 其中霍甫水丝蚓在 15 个水体中占绝对优势, 铜锈环棱螺为 5 个水体的第一优势种。底栖动物平均密度和生物量分别为 2 741.2 个/m² 和 47.2 g/m², 寡毛纲在密度中占绝对优势 (90.9%), 双壳纲和腹足纲在生物量中占 93.4%。密度河流最高、水库最低; 生物量湖泊最高、水库最低, 底栖动物类群数量组成水体类型间差异明显。物种多样性与丰富度和均匀度均显著相关, 但更多地受均匀度的影响。水库、湖泊的 Shannon 多样性、物种丰富度、均匀度指数均显著高于河流, 物种数差异接近显著水平。养殖型湖泊底栖动物密度显著高于非养殖型湖泊, 生物量、Shannon 和均匀度指数相反。Wright 指数显示, 太湖流域水库水质多处在清洁—轻污染等级, Shannon 和 BPI 指数说明绝大多数湖泊和河流处在中—重污染水平。

关键词: 大型底栖无脊椎动物; 群落结构; 物种多样性; 水体类型; 太湖流域

中图分类号: Q 178.1; S 917.3

文献标志码: A

淡水底栖动物主要由寡毛类、水生昆虫和软体动物 3 大类群构成, 是淡水生态系统的重要组成部分。很多研究表明, 底栖动物是初级生产者与较高营养级动物间的重要营养环节, 共同构建复杂的食物网结构; 底栖动物可促进营养物质的矿化、调节泥—水界面物质交换、促进水体自净, 在生态系统物质循环与能量流动中起着重要作用^[1]。底栖动物活动能力弱、生命周期长、对环境变化极为敏感、易于采样, 是环境质量监测的常用指示因子^[2]。

太湖是中国的第三大淡水湖泊, 太湖流域是中国城市化程度最高、经济最发达的地区之一, 在占 0.4% 的土地面积上, 以占 3.8% 的人口创造了占 11.0% 的 GDP。但流域社会经济高速发展和城市化进程加快的同时, 水质逐年恶化, 面临严重的富营养化问题^[3]。2009 年的水质监测结果表明, 太湖全湖处于中度富营养化状态, 流域内属于 IV、V

和劣 V 类水的河流长度分别占总评价长度的 18.6%、20.1% 和 54.4%。迄今为止, 对太湖流域内的单个湖泊、水库及河流的底栖动物已有较多的研究^[4-7], 但很少有从整个流域的角度对该区域的底栖动物进行研究^[8-9]。2010 年 5 月作者对该流域 7 条河流、8 座水库及 14 个湖泊的底栖动物进行了调查, 分析了底栖动物群落结构、群落类型, 探讨了水体类型及养殖活动对底栖动物数量及多样性的影响, 并利用底栖动物对流域内水体进行了生物学评价, 以期对太湖流域的水质保护与管理及生物多样性保护提供科学依据与理论支持。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

太湖流域面积 36 900 km², 地处长江三角洲核心区域, 北依长江, 南濒杭州湾, 东临东海, 西以

收稿日期: 2013-03-28 修回日期: 2013-09-13

资助项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07526-001); 农业部淡水生物多样性保护与利用重点开放实验室开放课题 (LFBCUO711); 上海高校知识服务平台上海海洋大学水产动物遗传育种中心 (ZF1206)

通信作者: 胡忠军, E-mail: zjhu@shou.edu.cn

茅山、天目山为界,行政区划分属江苏、浙江、安徽、上海三省一市。太湖流域是典型的平原水网地区,河流纵横交错、湖泊众多,水域总面积达 5 550 km²。该流域属亚热带季风气候,夏季高温多雨,冬季温和。

1.2 野外调查

按照太湖流域水体分布的空间异质性,并考虑到调查位点分布的均匀性,选择 29 个水体进行底栖动物调查,其中湖泊 14 个(洮湖、阳澄湖、团次、滆湖、塘南白塘、宋剑湖、淀山湖、漕湖、太湖、昆承湖、滴水湖、澄湖、长荡湖、南湖)、水库 7 座(横山水库、泗安水库、大溪水库、赋石水库、青山水库、对河口水库、泰山水库)及河流 8 条(川杨河、金汇港、京杭运河、浏河、大治河、西界岗河、西苕溪、蕴藻浜)。在太湖设置 5 个断面,每个断面设置 3 个站点,在其它水体设置 3 个站点,其中团次 1 个站点的样品丢失。在所选择的湖泊、水库及河流中沿着某一样线随机布设 3 个站点,站点间至少距离 2 km。在每个站点采用彼得逊采泥器采集 2 次,采集的底泥用 450 μm 的尼龙网过滤并清洗,剩余物装入 500 mL 的塑料瓶中,并加入 10%~15% 的福尔马林溶液保存。在实验室将底栖动物从白磁盘中挑出后保存在 8% 的福尔马林溶液中,鉴定种类、计数并称量样品湿质量(精确到 0.000 1 g)。调查期间向水体管理部门及周围村民咨询养殖情况,并在野外采样过程中记录每一水体是否有养殖网箱和围网及是否施肥等。将开展网箱和围网养殖等水产养殖活动的湖泊定义为“养殖型湖泊”,无此类养殖活动的湖泊称之为“非养殖型湖泊”。

1.3 重要值计算与摄食功能群划分

将整个流域的底栖动物数据合并计算每个物种的重要值(importance value, IV)以确定底栖动物群落的优势种,重要值的计算方法:IV = (相对密度 + 相对生物量 + 相对频度)/3。摄食功能群根据类群或种类属性,将其物种数、密度和生物量等分,然后分别计入相应的功能群中。

1.4 物种多样性

多样性指数采用 Margalef 丰富度指数(R)、Shannon-Weaver 多样性指数(H' , 下文简称 Shannon 指数)、Pielou 均匀度指数(J)和 Simpson 优势度指数(λ)进行计算,计算公式: $R = (S - 1)/\text{Ln}N$, $H' = - \sum (n_i/N) \text{Ln}(n_i/N)$, $J = H'/$

$\text{Ln}S$, $\lambda = \frac{n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)}$ 。式中: n_i 为各站点某个物种的多度; N 为各站点所有物种的多度和; S 为各站点的物种数。

1.5 水质生物学评价

采用 Shannon、Wright 和 BPI 指数评价水质。Wright 生物指数指每平方米颤蚓科的数量,Wright 生物指数的评价标准:< 100 为清洁,100~999 为轻污染,1 000~5 000 为中污染,> 5 000 为重污染^[10]。Shannon 指数水质判断标准: H' 为 0~1 是重污染,1~2 是中污染,2~3 是轻污染, $H' > 3$ 为清洁^[11]。 $BPI = \frac{\text{Lg}(N_1 + 2)}{\text{Lg}(N_2 + 2) + \text{lg}(N_3 + 2)}$, 式中 N_1 为寡毛纲、蛭纲和摇蚊科幼虫个体数, N_2 为多毛纲、甲壳纲和非摇蚊科幼虫水生昆虫个体数, N_3 为软体动物个体数,评价标准:< 0.1 为清洁,0.1~0.5 为轻污染,0.5~1.5 为 β -中污染,1.5~5.0 为 α -中污染,> 5.0 为重污染^[9]。

1.6 数据分析方法

水体类型间各底栖动物多样性指数、物种数、密度和生物量均不满足正态性分布且方差不齐,因此采用 Kruskal-Wallis 非参数检验,数据经秩变换后进行多重比较(Duncan 检验)^[12]。非养殖型与养殖型湖泊间仅物种丰富度指数(R)满足正态性和方差齐性要求,故 R 采用成组 T 检验,其它多样性指数、物种数、密度和生物量采用 Mann-Whitney 非参数检验。计算每个水体各物种的重要值以进行组平均聚类分析,从而用来确定底栖动物群落类型^[13]。

2 结果

2.1 整个流域物种组成及优势种分析

在太湖流域共调查到底栖动物 57 种,隶属 4 门、8 纲。其中,昆虫纲物种数最多,有 17 种,占总物种数的 29.8%;寡毛纲次之(15 种),占 26.3%;多毛纲、甲壳纲、腹足纲和双壳纲分别有 4~7 个物种(7.0%~12.3%);蛭纲和线形动物门未定纲物种数最低,仅 1 种(1.8%)。

霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*) 在太湖流域底栖动物中占绝对优势,重要值占总重要值的 34.1%。河蚬(*Corbicula fluminea*) 和铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*) 为常见种,重要值比例分别为 16.6% 和 10.7%。其它物种的重要值

比例均低于 4.7% (表 1)。

2.2 群落类型

聚类分析表明,可将太湖流域 29 个水体的底栖动物划分为 10 种群落类型(图 1)。宋剑湖、赋石水库、淀山湖、横山水库和漕湖均单独聚为 1

类,分别属于羽摇蚊(重要值为 69.3)、厚唇嫩丝蚓(*Teneridrilus mastix*) (28.1) + 红裸须摇蚊(*Prosilocerus akamusi*) (13.1)、扭蚌(27.5) + 铜锈环棱螺(12.7)、红裸须摇蚊(52.1)、霍甫水丝

表 1 太湖流域大型底栖动物名录及其重要值

Tab.1 Species list and their importance value (IV) of macrozoobenthos in Taihu Lake Watershed

门 phylum	纲 class	物种 species	拉丁名 scientific name	重要值 IV	
线形动物 Nematomorph	未定纲 unidentified class	线形动物	Nematomorpha sp.	0.22	
环节动物 Annelid	多毛纲 Polychaeta	石纓虫属 1 种	<i>Laonome</i> sp.	0.66	
		寡鳃齿吻沙蚕	<i>Nephtys oligobranchia</i>	1.33	
		沙蚕目 1 种	<i>Nereidida</i> sp.	1.26	
		疣吻沙蚕	<i>Tylorrhynchus heterochaetus</i>	1.57	
	寡毛纲 Oligochaeta	有栉管水蚓 皮氏管水蚓 多毛管水蚓 苏氏尾鳃蚓 克拉泊水丝蚓 巨毛水丝蚓 霍甫水丝蚓 奥特开水丝蚓 淡水单孔蚓 简明仙女虫 参差仙女虫 中华河蚓 尖头杆吻虫 厚唇嫩丝蚓 正颤蚓		<i>Aulodrilus pectinatus</i>	0.07
				<i>Aulodrilus pigueti</i>	0.23
				<i>Aulodrilus pluriseta</i>	0.30
				<i>Branchiura sowerbyi</i>	3.39
				<i>Limnodrilus claparedeianus</i>	0.85
				<i>Limnodrilus grandisetosus</i>	2.49
				<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	34.10
				<i>Limnodrilus udekemianus</i>	0.71
				<i>Monopylephorus limosus</i>	0.07
				<i>Nais pardalis</i>	0.07
				<i>Nais variabilis</i>	0.08
				<i>Rhyacodrilus sinicus</i>	1.64
				<i>Stylaria fossularis</i>	0.08
				<i>Teneridrilus mastix</i>	0.30
				<i>Tubifex tubifex</i>	0.30
				蛭纲 Hirudinea	蛭类 1 种
软体动物 Mollusca	腹足纲 Gastropod	长角涵螺	<i>Alocinma longicornis</i>	0.46	
		铜锈环棱螺	<i>Bellamya aeruginosa</i>	10.71	
		犁形环棱螺	<i>Bellamya purificata</i>	1.15	
		凸旋螺	<i>Gyraulus convexusculus</i>	0.07	
		纹沼螺	<i>Parafossarula striatulus</i>	0.09	
		大沼螺	<i>Parafossarulus eximius</i>	0.30	
		光滑狭口螺	<i>Stenothyra glabra</i>	0.30	
	双壳纲 Bivalvia	无齿蚌属 1 种	<i>Anodonta</i> sp.	0.28	
		扭蚌	<i>Arconaia lanceolata</i>	4.66	
		河蚬	<i>Corbicula fluminea</i>	16.61	
		褶纹冠蚌	<i>Cristaria plicata</i>	0.13	
		中国淡水蚌	<i>Novaculina chinensis</i>	0.07	
		湖球蚬	<i>Sphaerium lacustre</i>	1.78	
		蚌科 1 种	Unionidae sp.	0.08	

续表 1

门 phylum	纲 class	物种 species	拉丁名 scientific name	重要值 IV
节肢动物 Arthropod	甲壳纲 Crustacea	螺赢蜚属 1 种	<i>Corophium</i> sp.	1.52
		钩虾科 1 种	<i>Gammaridae</i> sp.	0.08
		太湖大螯蜚	<i>Grandidierella aihuensis</i>	0.91
		大螯蜚属 1 种	<i>Grandidierella</i> sp.	0.23
		等足目 1 种	<i>Isopoda</i> sp.	0.30
	昆虫纲 Insecta	蜻蜓目 1 种	Odonata sp.	0.08
		滨蝇科 1 种	Canacidae sp.	0.08
		摇蚊亚科 1 种	Chironominae sp.	0.07
		羽摇蚊群	<i>Chironomus</i> gr. <i>plumosus</i>	2.08
		菱跗摇蚊属 1 种	<i>Clinochironomus</i> sp.	0.15
		指突隐摇蚊	<i>Cryptochironomus digitatus</i>	0.52
		二叉摇蚊属 1 种	<i>Dicrotendipes</i> sp.	0.15
		异腹腮摇蚊属 1 种	<i>Einfeldia</i> sp.	0.25
		罗甘小突摇蚊	<i>Micropsetra logana</i>	0.30
		微小摇蚊属 1 种	<i>Mircochironomus</i> sp.	1.50
		灰跗多足摇蚊	<i>Polypedilum leucopus</i>	0.07
		梯形多足摇蚊	<i>Polypedilum scalaenum</i>	0.23
		多足摇蚊属 1 种	<i>Polypedilum</i> sp.	0.08
		花纹前突摇蚊	<i>Procladius choreus</i>	2.41
		红裸须摇蚊	<i>Propilocerus akamusi</i>	0.75
斑点摇蚊属 1 种	<i>Stictochironomus</i> sp.	0.07		
中国长足摇蚊	<i>Tanyus chinensis</i>	1.43		

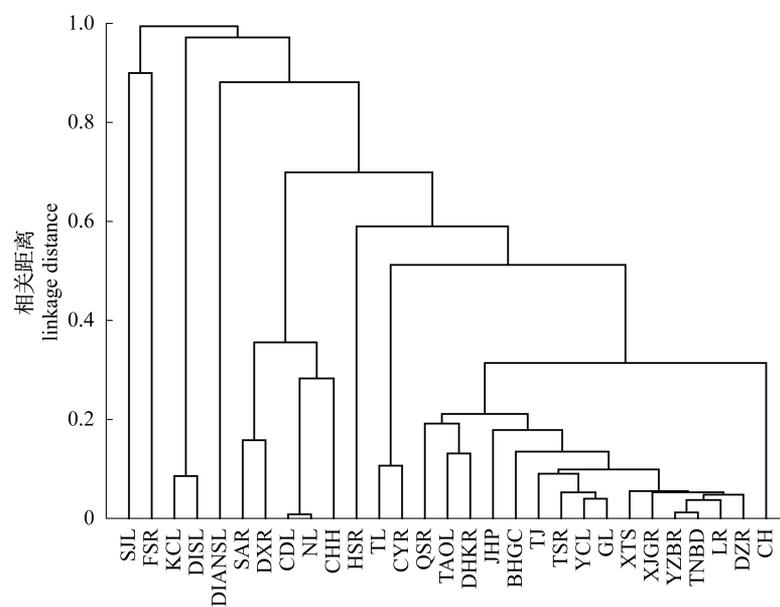


图 1 太湖流域底栖动物群落聚类分析

Fig. 1 Dendrogram of macrozoobenthic communities in Taihu Lake Watershed

SJL: 宋剑湖; FSR: 赋石水库; KCL: 昆承湖; DISL: 滴水湖; DIANSL: 淀山湖; SAR: 泗安水库; DXR: 大溪水库; CDL: 长荡湖; NL: 南湖; CHH: 澄湖; HSR: 横山水库; TL: 太湖; CYR: 川杨河; QSR: 青山水库; TAOL: 洮湖; DHKR: 对河口水库; JHP: 金汇港; BHGC: 京杭运河; TJ: 团汊; TSR: 泰山水库; YCL: 阳澄湖; GH: 渦湖; XTS: 西苕溪; XJGR: 西界岗河; YZBR: 蕴藻浜; TNBD: 塘南白荡; LR: 浏河; DZR: 大治河; CH: 漕湖

蚓(24.7) + 苏氏尾鳃蚓(*Branchiura sowerbyi*) (21.3)群落。川杨河与太湖聚为1类,为河蚬 + 霍甫水丝蚓群落,其中川杨河河蚬、霍甫水丝蚓的重要值分别为26.6和24.9,太湖则分别为37.9和23.3。昆承湖(优势种重要值为52.5)和滴水湖(51.0)聚为1类,为螺赢蛭群落。大溪水库与泗安水库聚为1类,为铜锈环棱螺 + 花纹前突摇蚊(*Procladius choreus*)群落。澄湖(34.9)、长荡湖(37.7)、南湖(35.9)聚为1类,为铜锈环棱螺群落。3座水库、5个湖泊和7条河流[青山水库(34.9)、对河口水库(37.2)、泰山水库(48.5)、洮湖(39.5)、阳澄湖(53.0)、团坎(58.1)、漉湖(62.9)、塘南白塘(79.3)、金汇港(40.2)、京杭运河(47.4)、浏河(60.6)、大治河(62.3)、西界岗河(62.6)、西苕溪(67.3)、蕴藻浜(100)]聚为一类,均为霍甫水丝蚓群落(图1)。

2.3 底栖动物现存量

太湖流域底栖动物平均密度和生物量分别为(2 741.2 ± 1 779.1)个/m²(mean ± SE,下文同)和(47.16 ± 12.42)g/m²。寡毛纲(2 491.8个/m²,90.9%)密度占绝对优势,蛭纲(0.5个/m²,0.02%)和线形动物门未定纲(0.2个/m²,0.01%)密度最低,其它纲密度为75.1~10.5个/m²(2.8%~0.3%)。双壳纲(29.07g/m²,61.6%)生物量最高,腹足纲(14.98g/m²,31.8%)次之,寡毛纲(1.83g/m²,3.9%)、多毛纲(0.88g/m²,1.9%)、甲壳纲(0.24g/m²,0.5%)和昆虫纲(0.15,0.3%)分别位列第3~7位,其它2纲生物量均低于0.004g/m²(均<0.007%)。

从水体类型来看,河流底栖动物[(9 407.2 ± 7 203.4)个/m²]的密度远远高于湖泊和水库,湖

泊[(677.6 ± 102.5)个/m²]的高于水库[(331.1 ± 70.3)个/m²]。生物量湖泊[(74.09 ± 21.96)g/m²]最高,河流[(21.61 ± 8.50)g/m²]居中,水库[(8.37 ± 5.57)g/m²]最低。非参数检验表明,密度在不同水体类型间无明显差异($\chi^2 = 3.696$, $P = 0.158 > 0.05$),但生物量差异极显著($\chi^2 = 10.081$, $P = 0.006 < 0.01$),其中湖泊底栖动物生物量显著高于河流和水库,河流与水库间无显著差异(Duncan检验)。

湖泊、河流和水库分别出现8、7和6个类群,河流未调查到线形动物、水库未发现多毛纲和甲壳纲动物。湖泊中寡毛纲密度最高(381.6个/m²,占56.3%),甲壳纲次之(138.3个/m²,20.4%),处于第3~6位的分别是昆虫纲、双壳纲、多毛纲和腹足纲(63.7~16.9个/m²,9.4%~2.5%),其它2纲密度均低于0.4个/m²(<0.06%)。河流中寡毛纲密度占绝对优势(9 137.1个/m²,占97.1%),多毛纲占第2位(226.7个/m²,2.4%),其它5纲的密度均低于27.5个/m²(<0.3%)。水库中寡毛纲密度最高(222.8个/m²,占67.3%),昆虫纲次之(103.1个/m²,31.1%),其它类群均低于3.6个/m²(均<1.1%)。湖泊中双壳纲(49.61g/m²,占67.0%)和腹足纲(23.15g/m²,31.2%)的生物量占了总生物量的98.2%。河流生物量前4位分别为双壳纲(9.11g/m²,占42.2%)、寡毛纲(5.71g/m²,26.5%)、腹足纲(3.56g/m²,16.5%)和多毛纲(3.19g/m²,14.8%),其它纲均低于0.04g/m²(均<0.16%)。水库中腹足纲(7.43g/m²,88.7%)占绝对优势,寡毛纲(0.53g/m²,6.3%)和昆虫纲(0.37g/m²,4.5%)次之,其它纲均低于0.05g/m²(均<0.5%)(图2)。

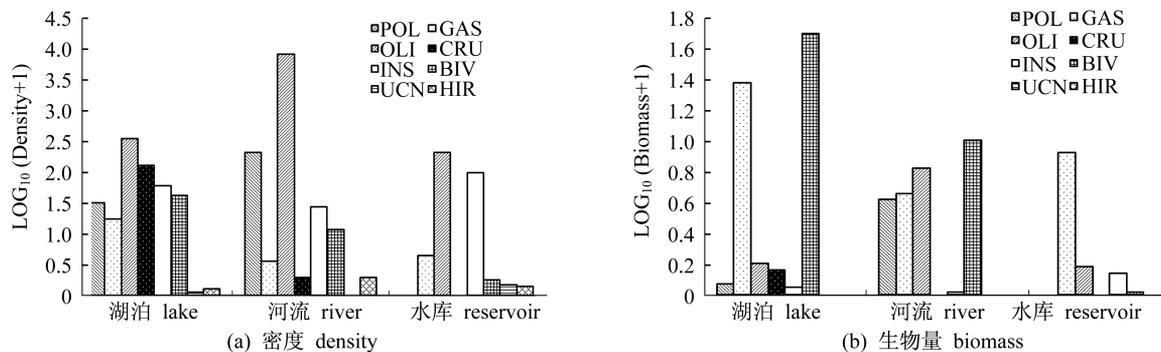


图2 太湖流域不同水体类型底栖动物类群的密度和生物量

Fig.2 Density and biomass of zoobenthic groups in different types of water body of Taihu Lake Watershed

POL:寡毛纲 Polychaeta, GAS:腹足纲 Gastropod, OLI:寡毛纲 Oligochaeta, CRU:甲壳纲 Crustacea, INS:昆虫纲 Insecta, BIV:双壳纲 Bivalvia, UCN:线性动物未定纲 Unidentified class of nematomorph, HIR:蛭纲 Hirudinea

养殖型湖泊[(729.5 ± 109.2)个/m²]底栖动物密度显著高于非养殖型湖泊[(650.9 ± 145.5)个/m²]($Z = 2.029, P = 0.043 < 0.05$),生物量后者[(86.96 ± 26.30)g/m²]与前者[(49.07 ± 39.95)g/m²]差异接近显著水平($Z = 1.916, P = 0.055 > 0.05$)。养殖型湖泊寡毛纲比例最高占76.0%,其次为昆虫纲(12.3%)和甲壳纲(8.0%),腹足纲占第4位(3.2%),未调查到双壳纲和线形动物门未定纲。非养殖型湖泊寡毛纲密度也是最高(45.0%),甲壳纲次之(27.6%),双壳纲(10.1%)、昆虫纲(7.7%)、多毛纲(7.4%)、腹足纲(2.1%)分别占第3~6位,蛭纲和线形动物门未定纲所占比例极低(均 < 0.05%)。养殖型湖泊腹足纲生物量占绝对优势(97.4%),非养殖型湖泊双壳类(86.4%)占绝对优势,腹足类(12.0%)次之。

2.4 摄食功能群

太湖流域直接收集者物种数最多,约占51%;过滤收集者次之,占26.3%。直接收集者密度最高,为2540.7个/m²,约占93%,其它摄食功能群密度均很低。过滤收集者生物量最高(占64%),刮食者次之(近32%),直接收集者和捕食者的生物量极低(表2)。

表2 太湖流域底栖动物摄食功能群组成
Tab.2 Functional group composition of macrozoobenthos in Taihu Lake Watershed

功能群 functional group	物种数 species number	密度/ (个/m ²) density	生物量/ (g/m ²) biomass
直接收集者 collector-gatherer	29(50.9)	2540.7(92.7)	1.94(4.1)
过滤收集者 filter-gatherer	15(26.3)	174.4(6.4)	30.18(64.0)
刮食者 scrapper	8(14.0)	10.7(0.4)	14.99(31.8)
捕食者 predator	5(8.8)	16.0(0.6)	0.04(0.1)

表3 养殖对太湖流域底栖动物多样性的影响

Tab.3 Effects of aquaculture practice on biodiversity of zoobenthos in Taihu Lake Watershed

湖泊类型 type of lake	<i>S</i>	<i>R</i>	<i>H'</i>	<i>J</i>	λ
非养殖湖泊 lakes without culture	5.2(0.4)	0.703(0.057)	0.939(0.081)	0.632(0.045)	0.525(0.039)
养殖湖泊 lake with culture	4.5(0.6)	0.548(0.089)	0.699(0.126)	0.431(0.060)	0.655(0.063)
<i>t</i> 或 <i>Z</i> 值 <i>t</i> or <i>Z</i> value ^a	1.025	1.512	1.897	2.573	1.991
<i>P</i> 值 <i>P</i> value	0.305	0.137	0.058	0.010*	0.047*

注:a. *R* 的统计值为 *t* 值,其它指数的为 *Z* 值; * . $P < 0.05$

Notes: a. The statistical value for *R* belongs to *t* value, which for other indices are *Z* values; * . $P < 0.05$

2.5 生物多样性

物种数(*S*)、物种丰富度指数(*R*)、Shannon 多样性指数(*H'*)、均匀度指数(*J*)均是水库最高、湖泊次之、河流最低,优势度指数(λ)正好相反。非参数检验表明,物种数在不同水体类型间[湖泊:(4.9 ± 0.3),水库:(5.3 ± 0.6),河流:(3.7 ± 0.5)]差异接近显著水平($\chi^2 = 5.559, P = 0.062 > 0.05, df = 2$),其它4种多样性指数在不同水体类型间均差异极显著($R: \chi^2 = 10.775, P = 0.005; H': \chi^2 = 12.858, P = 0.002; J: \chi^2 = 15.853, P < 0.001; \lambda: \chi^2 = 13.189, P = 0.001; df$ 均为 2),且 *R*、*H'* 和 *J* 均是河流显著小于湖泊和水库[*H'*: 湖泊(0.858 ± 0.070)、水库(1.046 ± 0.113)、河流(0.489 ± 0.086)], λ 河流显著高于湖泊和水库(图3)。

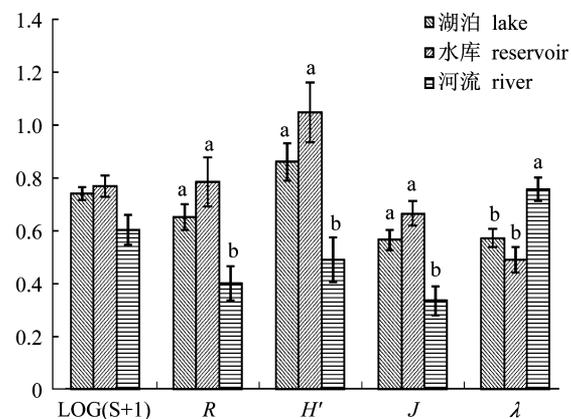


图3 太湖流域底栖动物多样性在水体类型间的比较
Fig.3 Comparison on biodiversity of macrozoobenthos among three water body types in Taihu Lake Watershed

养殖湖泊的 *S*、*R*、*H'* 和 *J* 均高于非养殖湖泊, λ 前者低于后者,后面4个指数在养殖与非养殖湖泊间差异显著或接近显著水平,但 *S* 差异不显著(表3)。

物种多样性 H' 与均匀度 J 显著相关 ($r = 0.829, df = 98, P < 0.001$), 与物种丰富度 S 亦显著相关 ($r = 0.693, df = 98, P < 0.001$), 但前两者

的相关系数明显大于后两者的, 说明物种多样性 H' 值的变化更多地依赖于 J 而不是 S 的变化(图 4)。

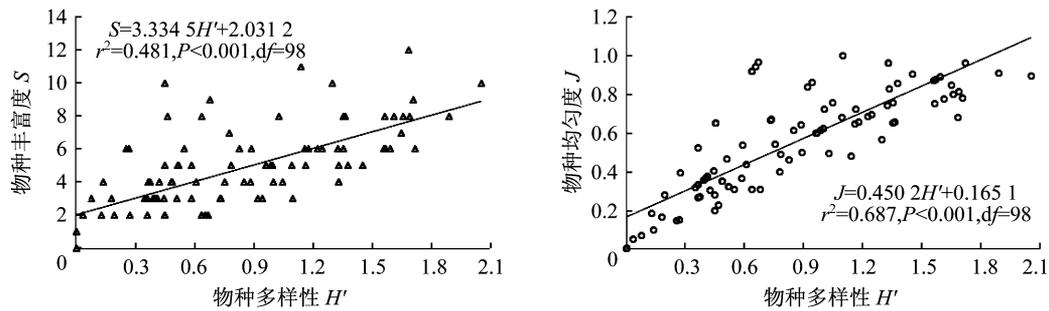


图 4 太湖流域底栖动物物种多样性 (H') 与物种丰富度 (S) 及均匀度 (J) 间的相关关系

Fig. 4 Relationship between species richness S and diversity H' and between evenness J and diversity H' of the macrozoobenthic community in Taihu Lake Watershed

2.6 水质生物学评价

利用 Wright、Shannon 多样性和 BPI 指数对不同水体类型的水质进行了评价, 结果列于表 4。Wright 指数显示, 近 50% 的站点为清洁等级, 处在轻污染状态的站点约占 1/3, 重污染站点数极少 (占 5.1%)。根据 Shannon 多样性指数评价结

果, 绝大多数站点处在重污染 (占 65.3%) 和中污染状态 (33.7%), 处在清洁和轻污染状态站点数几乎为零。BPI 指数评价结果表明, 处在中污染状态的站点占 71.4%, 处在清洁、轻污染和重污染状态的站点数相似 (约占 10%) (表 4)。

表 4 太湖流域不同水体类型底栖动物水质生物学评价

Tab. 4 Bioassessment of water quality of different types of water body in Taihu Lake Watershed using zoobenthos

评价指数 index	湖泊 lake	水库 reservoir	河流 river	整体 total
Wright 指数 Wright index				
清洁 clear	26 (49.1)	11 (52.4)	11 (45.8)	48 (49.0)
轻污染 lightly polluted	19 (35.8)	9 (42.9)	4 (16.7)	32 (32.7)
中污染 moderately polluted	8 (15.1)	1 (4.8)	4 (16.7)	13 (13.3)
重污染 seriously polluted	0 (0)	0 (0)	5 (20.8)	5 (5.1)
Shannon 指数 Shannon index				
清洁 clear	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
轻污染 lightly polluted	1 (1.9)	0 (0)	0 (0)	1 (1.0)
中污染 moderately polluted	21 (39.6)	9 (42.9)	3 (12.5)	33 (33.7)
重污染 seriously polluted	31 (58.5)	12 (57.1)	21 (87.5)	64 (65.3)
BPI 指数 BPI index				
清洁 clear	8 (15.1)	0 (0)	0 (0)	8 (8.2)
轻污染 lightly polluted	8 (15.1)	0 (0)	2 (8.3)	10 (10.2)
β 中污染 β -moderately polluted	15 (28.3)	5 (23.8)	9 (37.5)	29 (29.6)
α 中污染 α -moderately polluted	18 (34.0)	15 (71.4)	8 (33.3)	41 (41.8)
重污染 seriously polluted	4 (7.5)	1 (4.8)	5 (20.8)	10 (10.2)

注: 括号外数据为站点数, 括号内数据为百分比

Notes: Data outside the parentheses denote number of stations, data in parentheses are percentage

3 讨论

太湖流域绝大多数底栖动物优势种都是耐污染能力强的物种 (如霍甫水丝蚓的耐污值为 9.4、

羽摇蚊 9.0、铜锈环棱螺 8.6、苏氏尾鳃蚓 (*Branchiura sowerbyi*) 8.5、河蚬 8.2、螺赢蜚 8.1、红裸须摇蚊 8.0^[14]、扭蚌 (*Arconaia lanceolata*) 和厚唇嫩丝蚓无耐污值记录)。整个流域的绝对优

势种为霍甫水丝蚓,重要值约占所有物种重要值的 34% (表 1),其在 51.7% (15/29) 的水体中占绝对优势。铜锈环棱螺在 17.2% 的水体中的优势度处于第一位。霍甫水丝蚓是一种全世界分布种类,在受有机废水排放影响的区域,该物种趋向于占绝对优势,是一种良好的有机污染指示生物^[15]。在中国霍甫水丝蚓是富营养化水域最为普遍的优势种^[16],铜锈环棱螺亦是耐污染能力强的物种。在太湖和巢湖流域河流中,霍甫水丝蚓为第一优势种,铜锈环棱螺为第 2 或 3 优势种^[9,17],在太湖流域上游水系亦是霍甫水丝蚓占优势^[5]。由此可见,太湖流域的污染程度已经到了非常严峻的程度。

根据优势种耐污值,太湖流域 7 座水库几乎都为富营养化水体(除厚唇嫩丝蚓耐污值无报道外,其它优势种均为耐污种)。但生物指示法并不一定适合于水库的营养状态与水质评价,如霍甫水丝蚓也可成为寡—中营养水域的优势种^[18-22]。Shannon、BPI 指数的评价结果表明,该流域水库站点均处于中—重污染状态,且污染程度比利用这 2 种方法对湖泊、河流的评价结果更为严重(表 4),这与水库远离市区、污染程度比湖泊和河流要低的事实不符合。而且,大量的研究指出,Shannon 等指数不适合用于水库的水质评价,相比较而言 Wright 指数更适合一些^[23-27]。因此本研究利用 Wright 指数来评价太湖流域水库的水质,结果表明该流域 95.3% 的水库站点的水质处在清洁—轻污染等级(表 4)。Wright 指数显示太湖流域绝大多数湖泊、河流站点的水质处在清洁—轻污染状态(表 4),这与太湖流域水质现状(太湖健康状况报告 2009)及其它学者的报道结果^[9]不符合。因此,本研究选择 Shannon 指数和 BPI 指数对湖泊和河流水质进行评价,结果表明 BPI 指数指示的污染程度稍低于 Shannon 的评价结果,且河流的污染程度高于湖泊,两种方法均显示太湖流域绝大多数湖泊、河流站点处在中—重污染等级,与生物指示种法的评价结果基本一致。

摄食功能群结构可以反应环境质量及其变化^[28]。狭食性动物如撕食者为敏感物种,分布于健康的生态系统中。而广食性动物如收集者、滤食者的食物来源广泛,为耐污种^[29]。本研究发现,太湖流域底栖动物摄食功能群以直接收集者和过滤收集者占优势,因此摄食功能群组成亦说

明整个流域的水体污染较为严重。

国内外存在大量的基于底栖动物的水质生物学评价研究,但很多报道表明,一些生物指数适合而另外一些不适合对某一水体的水质进行评价^[18-22],即各种指数的评价结果并不一致,如吴召仕等^[9]对太湖流域主要河流水质进行的生物学评价结果表明,Wright 指数指示的污染程度明显低于 BPI 指数所显示的,本实验的结果与此类似(表 4)。各生物指数的适用条件不尽一致,因此吴召仕等^[9]认为国内底栖动物水质生物评价仍有待进一步发展完善。

太湖流域底栖动物密度河流最高、水库最低,多样性指数水库最高、河流最低,水库和湖泊显著高于河流。有研究表明,水体生态系统中的物种多样性随着水体营养水平的增加,呈现单峰分布,即在中度营养水平的生境中多样性最高,如底栖动物与浮游动物^[16,30-32]。随着营养盐水平进一步增加,水体从中营养向超富营养转变的过程中,多样性下降,而高度耐污物种如霍甫水丝蚓的密度可能会非常高,如东湖超富营养站点该物种的年均密度可达 3 000 个/m²,最高可达 10 000 个/m²^[16],在污染极度严重的俄罗斯圣彼得堡 Neva Mouth 和多伦多港口局部地区,霍甫水丝蚓密度达 4~6 万个/m²^[33-34]。因此,耐污种如霍甫水丝蚓严重污染的地方出现的极端高密度会导致某水体或水体类型的平均密度大幅增加。在太湖流域霍甫水丝蚓密度高于 2 000 个/m²的站点均为河流站点,其中京杭运河有 2 个站点的密度在 1 万个/m²左右,上海金汇港有一站点的密度超过 16 万个/m²,由此推测河流的污染水平可能高于湖泊和水库,耐污种如霍甫水丝蚓极高的密度提升了河流的整体密度,从而导致河流底栖动物密度明显高于湖泊和水库(图 2),耐污种极高的密度降低了群落的均匀度,污染严重的河流也会导致清洁种、中度耐污种的消失,从而降低物种丰富度。物种多样性(Shannon 指数)与物种丰富度和均匀度均显著正相关(图 4),因此河流均匀度和物种丰富度的下降共同导致了河流底栖动物多样性的下降,从而导致河流的 Shannon 多样性指数显著地低于湖泊和水库(图 3)。

参考文献:

- [1] 谢志才,马凯,叶麟,等. 保安湖大型底栖动物结构与分布格局研究[J]. 水生生物学报,2007,31(2):

- 174 - 183.
- [2] Lewis L J, Davenport J, Kelly T C. A study of the impact of a pipeline construction on estuarine benthic invertebrate communities [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, 55 (2) : 213 - 221.
- [3] 毛新伟,徐枫,徐彬,等.太湖水质及富营养化变化趋势分析 [J]. *水资源保护*, 2009, 25 (1) : 48 - 51.
- [4] 夏爱军,陈校辉,蔡永祥,等.长江江苏段底栖动物群落结构现状及其水质的初步评价 [J]. *海洋渔业*, 2006, 28 (4) : 272 - 277.
- [5] 王备新,徐东炯,杨莲芳,等.常州地区太湖流域上游水系大型底栖无脊椎动物群落结构特征及其与环境的关系 [J]. *生态与农村环境学报*, 2007, 23 (2) : 47 - 51.
- [6] 蔡永久,龚志军,秦伯强.太湖大型底栖动物群落结构及多样性 [J]. *生物多样性*, 2010, 18 (1) : 50 - 59.
- [7] 孙月娟,王武,刘其根,等.江苏阳澄湖螺类群落的空间分布格局 [J]. *长江流域资源与环境*, 2011, 20 (6) : 711 - 716.
- [8] 蔡永久,姜加虎,张路,等.长江中下游湖泊大型底栖动物群落结构及多样性 [J]. *湖泊科学*, 2010, 22 (6) : 811 - 819.
- [9] 吴召仕,蔡永久,陈宇炜,等.太湖流域主要河流大型底栖动物群落结构及水质生物学评价 [J]. *湖泊科学*, 2011, 23 (5) : 686 - 694.
- [10] Wright S. *Limnological survey of western Lake Erie*. U. S [R]. Fish and Wildlife Service, Special Scientific Report, Fisheries No. 139, 1955.
- [11] 苏华武,江晶,温芳妮,等.湖北清江流域叹气沟河底栖动物群落结构与水质生物学评价 [J]. *湖泊科学*, 2008, 20 (4) : 520 - 528.
- [12] 刘万里,薛茜,曹明芹,等.用 SPSS 实现完全随机设计多组比较秩和检验的多重比较 [J]. *地方病通报*, 2007, 22 (2) : 27 - 29.
- [13] 胡忠军,刘其根,陈立婧,等.上海崇明明珠湖摇蚊幼虫群落结构特征及其对水质的指示作用 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20 (4) : 929 - 936.
- [14] 张跃平.江苏大型底栖无脊椎动物耐污值、BI 指数及水质生物评价研究 [D]. 南京:南京农业大学, 2006.
- [15] Brinkhurst R O, Cook D G. Aquatic earthworms (Annelida: Oligochaeta) [C] // Hart C W, Fuller SLH, eds. *Pollution ecology of freshwater invertebrates*. New York: Academic Press, 1974: 143 - 156.
- [16] 龚志军,谢平,唐汇涓,等.水体富营养化对大型底栖动物群落结构及多样性的影响 [J]. *水生生物学*, 2001, 25 (3) : 210 - 216.
- [17] 高峰,尹洪斌,胡维平,等.巢湖流域春季大型底栖动物群落生态特征及与环境因子关系 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21 (8) : 2132 - 2139.
- [18] Särkkä J. On the ecology of littoral oligochaeta of an oligotrophic Finnish lake [J]. *Holarctic Ecology*, 1982, 5 (4) : 396 - 404.
- [19] Petridis D, Sinis A. Benthic macrofauna of Tavropos Reservoir (central Greece) [J]. *Hydrobiologia*, 1993, 262 (1) : 1 - 12.
- [20] Lang C. How to interpret changes of zoobenthos (oligochaetes and chironomids) in Lake Neuchâtel between 1984 to 2002 [J]. *Bulletin de la Societe Vaudoise des Sciences Naturelles*, 2007, 90: 133 - 149.
- [21] Cui Y D, Wang H Z. Ecology of macrozoobenthic communities in two plateau lakes of Southwest China [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2008, 26 (4) : 345 - 352.
- [22] Liu Q G, Zha Y T, Hu Z J. Spatial distribution of macrozoobenthos in a large and deep impoundment: Xin' anjiang reservoir, Zhejiang province [C] // Han B P, Liu Z W, eds. *Tropical and Sub-Tropical Reservoir Limnology in China*. Springer Science + Business Media B. V. , 2011: 135 - 153.
- [23] 黄道明,杨汉运,林永泰,等.福建省水库底栖动物及渔业利用前景 [J]. *湖泊科学*, 1995, 7 (2) : 164 - 172.
- [24] 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.
- [25] 池仕运,彭建华,万成炎,等.湖北省三道河水库底栖动物的初步研究 [J]. *湖泊科学*, 2009, 21 (5) : 705 - 712.
- [26] 张敏,邵美玲,蔡庆华,等.丹江口水库大型底栖动物群落结构及其水质生物学评价 [J]. *湖泊科学*, 2010, 22 (2) : 281 - 290.
- [27] Hu Z J, Wu H, Liu Q G. The ecology of zoobenthos in reservoirs of China: A mini-review [C] // Han B P, Liu Z W, eds. *Tropical and Sub-Tropical Reservoir Limnology in China*. Springer Science + Business Media B. V. , 2011: 155 - 165.
- [28] Engle V D, Summers J K. Latitudinal gradients in benthic community composition in western Atlantic estuaries [J]. *Journal of Biogeography*, 1999, 26 (5) : 1007 - 1023.
- [29] Cummins K W, Klug M J. Feeding ecology of stream invertebrates [J]. *Annual Review of Ecology and*

- Systematics, 1979, 10(1): 147 – 172.
- [30] Dodson S. Predicting crustacean zooplankton species richness [J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, 37(4): 848 – 856.
- [31] Milbrink G. An improved environmental index based on the relative abundance of oligochaete species [J]. *Hydrobiologia*, 1983, 102(2): 89 – 97.
- [32] Dévai G, Moldován J. An attempt to trace eutrophication in a shallow lake (Balaton, Hungary) using chironomids [J]. *Hydrobiologia*, 1983, 103(1): 169 – 175.
- [33] Milbrink R O. Distribution and abundance of tubificid (Oligochaeta) species in Toronto Harbour, Lake Ontario [J]. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1970, 27(11): 1961 – 1969.
- [34] Finogenova N P. Oligochaete communities at the mouth of the Neva and their relationship to anthropogenic impact [J]. *Hydrobiologia*, 1996, 334(1–3): 185 – 191.

Community structure of zoobenthos in spring and their application to bioassessment of water quality in Taihu Lake Watershed

CHEN Liping¹, GAO Xin², NIU Cuijuan², HE Peimin¹, LIU Qigen¹, SUN Yuejuan¹, HU Zhongjun^{1*}

(1. Key Laboratory of Freshwater Fishery Germplasm Resources, Ministry of Agriculture,

Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Key Laboratory for Biodiversity Science and Ecological Engineering, Ministry of Education, College of Life Sciences,

Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The macrozoobenthic assemblages in 7 reservoirs, 8 rivers, and 14 lakes of Taihu Lake Watershed were investigated in May, 2010. Totally, 57 species, belonging to 8 classes, representatives of 4 phyla, were collected. Of those, Insecta (17 species) and Oligochaeta (15 species) were the most abundant in species number. As a whole, the zoobenthic assemblage in this watershed was predominated by *Limnodrilus hoffmeisteri*. According to cluster analysis (CA), there existed 10 community types in the selected 29 water bodies, 15 of which were prevailed by *L. hoffmeisteri* and 5 of which by *Bellamya aeruginosa*. The mean density and biomass in the whole basin were 2741.2 ind/m² and 47.2 g/m², respectively. Oligochaeta was predominant in density (about 91%), and Bivalvia together with Gastropod contributed about 93% of the total biomass. Among the different water body types, there were marginally significant or conspicuous differences in density with the maximum for river and the minimum for reservoir, and in biomass with the maximum for lake and the minimum for reservoir. Meanwhile, the numerical composition of macrozoobenthic groups (i. e. at the taxonomic level of class) differed obviously between the water body types. Although Shannon-Weaver diversity index (H') was conspicuously correlated with richness (species number, S), H' was more strongly governed by evenness (J). H' , J , and Margalef species richness (R) in lake and reservoir were all significantly higher than those in river, respectively, and S did marginally conspicuously. The density in lakes with practice of aquaculture was significantly higher than in ones without. The reverse were found for biomass, H' , and J . According to BPI index and H' , the most stations of lake and river were moderately or seriously polluted, and the most reservoirs were clear or slightly polluted based on Wright index.

Key words: macroinvertebrate; community structure; species diversity; water body type; Taihu Lake Watershed

Corresponding author: HU Zhongjun. E-mail: zjhu@shou.edu.cn