

大莲湖水源地浮游动物和底栖动物的 污染生物学特征与污染分析

刘兴国^{1,2*}, 徐皓^{1,2}, 朱浩², 王小冬²

(1. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所,农业部渔业装备与工程重点开放实验室,上海 200092;

2. 中国水产科学研究院池塘生态工程研究中心,上海 201606)

摘要: 采用浮游动物、底栖动物污染生物学指数方法分析大莲湖水源地不同区域的污染状况,结合水质指标分析不同生物学指数对水体污染的评价效果,运用成分分析法综合分析大莲湖水源地的污染特点。结果显示,夏秋季节大莲湖水源地不同区域的浮游动物 Shannon Wiener 指数(H_1)为 0.3~1.8, Margalef 多样性指数(D)为 1.0~10.4;底栖动物 Shannon Wiener 指数(H_2)为 0.81~1.26, Goodnight 指数(G)为 0.30~0.88,均显示呈污染状态,对应水质指标和相关性分析结果,采用浮游动物 Margalef 多样性指数(D)和底栖动物的 Goodnight 修订指数(G)可以更好的反应水体污染状态。综合主成分分析结果,大莲湖水源地不同区域的污染程度依次为水森林>内河>池塘>外河>湖区,表明大莲湖水源地的湖区有一定的水质净化涵养作用,水源地的污染主要来自内部有机物淤积和池塘养殖,应采取地形塑造、底泥疏浚、水网沟通、控制池塘养殖等修复措施。

关键词: 浮游动物;底栖生物;生物学指数;污染特征

中图分类号: Q 178.1; X 171.1

文献标志码: A

大莲湖水源地(31°4'~31°5'N,121°0'~120°59'E)距上海市区 58 km,总面积 14.6 km²,由湖泊、河道、水森林、池塘等组成,其中河湖水面占 32.3%、池塘占 30.3%、沼泽占 23.4%,其它 14%^[1]。大莲湖水源地是上海市重要的水源保护区,市区 70% 的饮用水源来自该地区,其生态环境状况对上海市民的饮用水安全有重要影响^[2-3]。近年来,大莲湖水源地污染程度日益严重,水源净化涵养功能已基本丧失。为了解大莲湖水源地的污染状况,2008—2009 年对大莲湖水源地进行了本底调查,并结合该次对浮游动物和底栖动物调查结果,采用浮游动物、底栖动物生物学指数法和水质理化分析法,分析水源地污染的生物学评价效果和大莲湖水源地的污染特征,为建立水域污染综合评价方法和实施生态修复提供支持。

20 世纪 90 年代以来,国际上开始重视利用生物多样性指数方法评价水域环境的研究^[4]。由于水体有机污染与浮游动物有着密切的关系,许多研究认为可以利用浮游动物判断水质污染状况^[5-6]。刘超等^[7],张丹等^[8]和曾阳等^[9]利用大型浮游动物多样性指数(H)与水体理化参数(Pb/n)的相关性分析,对水质污染状况进行了评价,取得了较好的效果。同时,由于不同底栖动物对环境条件要求较高,利用底栖动物可作为水质评价指示生物的研究也很多^[10-11]。一些国家甚至把底栖动物的生物指标作为水质管理的依据,如英国^[12]和澳大利亚^[13]等国家把基于底栖动物水质评价参数作为水环境管理的重要依据。利用生物判断水域环境污染状况,最主要的是建立相应的指数范围,目前利用浮游动物 Shannon-Wiener(H)指数评价水质的标准一般采用 Wilhm

收稿日期:2012-09-30 修回日期:2012-12-26

资助项目:“十二五”国家科技支撑计划(2012BAD25B01);公益性行业(农业)科研专项(201203083)

通信作者:刘兴国,E-mail:liuxg1223@163.com

等^[14]提出水体污染评价标准和黄玉瑶等^[15]提出的5级水质生物评价标准。利用底栖动物的Shannon Wiener(H)指数评价水质的标准一般参考而黄玉瑶等^[15]、陆强国^[16]的方法。在其它指数方面,Wright和Todd建立的Goodnight指数(Goodnight&Whitley Index)^[17]以及Saprobic指数和BI指数等^[18-19]也被用作水质评价指数。

实验采用浮游动物Shannon Wiener(H_1)指数和Margalef多样性指数(D)、底栖动物Shannon Wiener指数(H_2)和Goodnight指数(G)分别分析大莲湖水源地污染状况,并结合水质理化指标进行相关性分析与综合成分分析,分析影响不同生物学指数的理化因子和不同生物学指数评价水体污染的效果,通过主成分分析法分析大莲湖不同区域的污染状况,为大莲湖水源地实施生态修复提供依据。

1 材料与方 法

1.1 调查时间、地点

于2009年7月、8月、9月、10月各采样1次,根据大莲湖水源地的组成特点,分别在外河(01)、池塘(02、03)、湖区(07)、水森林(08)、内部河网(04、05、06、09)、沼泽地(10)等选择10个取样点(图1)。

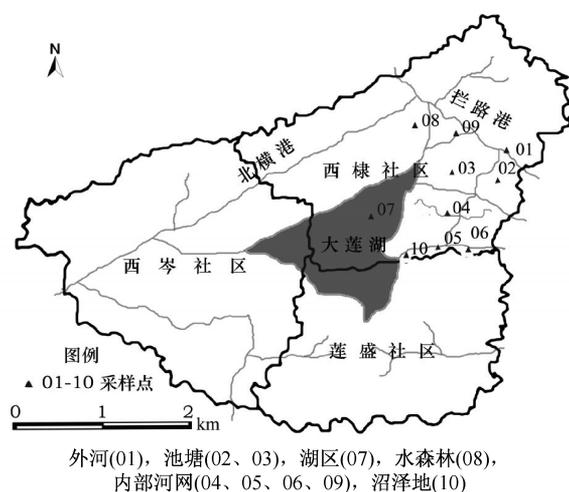


图1 大莲湖水源地生物调查样点分布情况
Fig.1 Sampling sites of bio-investigation in Dalianhu water source area

1.2 调查方法

浮游动物 用5L有机玻璃采水器采集20L水样,用25#浮游生物网过滤,样品收集后用

5%的福尔马林溶液固定,每个样品个体全部计数^[20-21]。枝角类鉴定按文献^[22],桡足类鉴定按文献^[23]进行。

轮虫 将1mL浓缩均匀的浮游植物样品液放至浮游动物计数框,在100倍显微镜下计数,平行3~5次,取均值^[24]。

底栖生物:用1/16m²彼得生采泥器,在每个采样点采集2次泥样混合,采得的泥样经孔径为0.45mm的筛网洗涤后,剩余物带回实验室,置于白磁盘中活体分拣,样品以7%甲醛固定,24h后移入75%的乙醇中保存。标本经鉴定、计数和称重后,换算成每平方米的含量^[25]。

1.3 分析方法

Shannon-Wiener 指数

$$H = - \sum P_i (\log_2 P_i), P_i = n_i / N \quad (1)$$

式中, N 为所有浮游动物个数; n_i 为第 i 个种的个数; f_i 为该种在各站位出现的频率。

多样性指数 $H > 3$ 水质清洁,2~3为轻度污染,1~2为中度污染,0~1重度污染,多样性指数等于0时为严重污染^[26]。

Margalef 多样性公式

$$D = S - 1 / \ln N \quad (2)$$

式中, D 多样性指数; S 种类数; N 个体数。

D 值:1.0~2.0 中度污染,2.0~3.0 水质轻度污染^[27]。

优势度 Dominance(Y)^[28]

$$Y = n_i \cdot f_i / N \quad (3)$$

Goodnight 修订指数

$$G = N - N_{oli} / N \quad (4)$$

式中, N 为样品中底栖动物个体总数; N_{oli} 为样品中寡毛类个体总数。

G :1~0.4 清洁至轻污染,0.4~0.2 中污染,0.2~0 重污染,0 严重污染(0的含义为样品中无底栖动物生存)^[17]。

生物学污染指数(BPI)

$$BPI = \text{Log}(N_1 + 2) / \text{Log}(N_2 + 2) + \text{Log}(N_3 + 2) \quad (5)$$

式中, N_1 为寡毛类、蛭类和摇蚊幼虫密度(个/m²), N_2 为多毛类、甲壳类、除摇蚊幼虫以外的其它水生昆虫的密度(个/m²), N_3 为软体类密度(个/m²)^[29]。

BPI : <0.1 清洁,0.1~0.5 轻污染,1.5~5 中污染,>5 重污染(无生物生存为严重污染)。

1.4 水质分析与数据处理

水样采集和处理方法执行《水质和废水监测分析方法》^[30], 水体中总氮、总磷、氨氮、亚硝态氮、硝酸盐氮等采用哈希 HACH DR-2800 仪器测定; 化学耗氧量 (COD_{Mn}) 采用高锰酸钾法测定; 水体总悬浮物 (TSS) 采用孔径 0.45 μm 滤膜过滤, 103 ~ 105 °C 烘干至恒重后测定。

数据处理用 SPSS (Statistics) 19.0 软件统计, 用单因素方差分析和 Duncan 氏多重比较和显著性检验。生物学指数与水质污染指标之间的相关性用 SPSS 19.0 软件 Pearson 分析。主成分分析采用 SPSS 19.0 软件, 在主成分分析中, 根据 9 个因子的计算结果确定 2 个主成分并重新计算, 得

到最终结果^[31-33]。

2 结果

2.1 浮游动物的生物学指数

Shannon-Wiener 指数 (H_1) 根据 2008、2009 年夏秋季 (6—10 月份) 的调查数据, 夏秋季大莲湖水源地水域共检出浮游动物 15 属 24 种。其中轮虫 6 属 13 种, 占总属数的 40.0%, 占总种数的 54.2%; 枝角类 4 属 6 种, 占总属数的 26.7%, 占总种数的 25.0%; 桡足类 5 属 5 种, 占总属数的 33.3%, 占总种数的 20.8%。不同水域中的浮游动物组成、分布及 Shannon Wiener 指数 (H_1) 见表 1。

表 1 大莲湖水源地的浮游动物种类分布及 Shannon-Wiener 指数 (H_1)
Tab. 1 Distribution and Shannon-Wiener indices of zooplankton in Dalianhu water source

	外河 external river	池塘 ponds	内河网 inner river	湖区 lake	水森林 water-forest	沼泽地 marshland
轮虫 Rotifera						
臂尾轮虫属 <i>Brachionus</i>						
粤花臂尾轮虫 <i>B. calyciflorus</i>	+	+	+	+		+
角突臂尾轮虫 <i>B. angularis</i>	+		+	+		+
剪形臂尾轮虫 <i>B. forficula</i>			+			
镰状臂尾轮虫 <i>B. falcatus</i>	+			+		
壶状臂尾轮虫 <i>B. urceus</i>						+
裂足臂尾轮虫 <i>B. diversicornis</i>	+	+	+	+		
龟甲轮虫属 <i>Keratella</i>						
螺型龟甲轮虫 <i>K. cochlearis</i>	+			+		
矩形龟甲轮虫 <i>K. quadrata</i>			+			
曲腿龟甲轮虫 <i>K. valga</i>						
多肢轮虫属 <i>Polyarthra</i>						
针簇多肢轮虫 <i>P. trigla</i>		+				
三肢轮虫属 <i>Filinia</i>						
迈氏三肢轮虫 <i>F. maior</i>		+	+			
晶囊轮虫属 <i>Asplanchna</i>						
晶囊轮虫 <i>A. sp.</i>	+	+	+	+		+
水轮虫属 <i>Epiphanes</i>						
锥尾水轮虫 <i>E. senta</i>			+			
枝角类 Cladocera						
无节幼体 Nauplii	+	+	+	+		
象鼻溞属 <i>Bosmina</i>						
长额象鼻溞 <i>B. longirostris</i>	+	+	+	+		
脆弱象鼻溞 <i>B. fatalis</i>	+		+	+		
秀体溞属 <i>Diaphanosoma</i>						
短尾秀体溞 <i>D. Brachyurum</i>	+	+	+			+
裸腹溞属 <i>Moina</i>						
近亲裸腹溞 <i>M. affinis</i>	+		+	+		+
尖额溞属 <i>Alona</i>						
中型尖额溞 <i>M. intermedia</i>			+	+		

续表 1

	外河 external river	池塘 ponds	内河网 inner river	湖区 lake	水森林 water-forest	沼泽地 marshland
桡足类 Copepoda						
华哲水蚤属 <i>Sinocalanus</i>						
中华哲水蚤 <i>S. sinensis</i>			+	+	+	+
许水蚤属 <i>Schmackeria</i>						
球状许水蚤 <i>S. forbesi</i>			+	+		
中镖水蚤属 <i>Sinodiptoms</i>						
大型中镖水蚤 <i>S. sarsi</i>	+		+			+
剑水蚤属 <i>Cyclops</i>						
近邻剑水蚤 <i>C. vicinus</i>	+	+	+	+	+	+
中剑水蚤属 <i>Mesocyclops</i>						
广布中剑水蚤 <i>M. Leuckarti</i>	+		+	+	+	+
合计	14	9	19	15	3	10
Shannon Wiener 指数 (H_1)	1.55 ^a	1.34 ^a	1.56 ^a	1.83 ^a	0.3 ^b	1.52 ^a

注:表中不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Notes: Different small letters of table indicate significant difference ($P < 0.05$).

从浮游动物的分布情况来看,大莲湖水源地区域和河道中的浮游动物种类相对较多,池塘和水森林水体中的浮游动物种类较少。

Shannon-Wiener 多样性指数 (H_1) 显示,湖区污染较轻(1.83),水森林污染较重(0.3)。

Margalef 物种多样性指数 (D) 调查数据显示,2008、2009 年夏秋季节大莲湖水源浮游动物的平均密度为 1 580 个/L,在密度组成中,轮虫为 710 个/L,占总密度的 44.9%;桡足类 500 个/L,占总密度的 31.7%;枝角类 307 个/L,占总密度的 23.4%。在大莲湖不同区域,浮游动物的密度差异很大。其中,沼泽地水体中浮游动物密

度最高为 6 740 个/L,其次为池塘 2 193 个/L,外河和湖区水体中浮游动物的密度相对较低,约为 300 个/L,仅为养殖池塘水体浮游动物密度的 1/7 (表 2)。

应用 Margalef 指数 (D) 分析发现,大莲湖水源不同区域的水森林(1.0)、沼泽地(2.4)、池塘(2.9)的 Margalef 多样性指数 (D) 较低,外河水体中的 (D) 值最高(10.4)。按照 Margalef 多样性指数 (D) 水体污染评价指标,大莲湖水源地区域的水森林污染最重,其次是沼泽地、池塘,外河水水质较好(表 3)。

表 2 大莲湖水源水域浮游动物密度和 Margalef 指数 (D)Tab. 2 Density and Margalef index (D) of zooplankton in Dalianhu water source ($\times 100$)

	外河 external river	池塘 ponds	内河 inner river	湖区 lake	水森林 water forest	沼泽地 marshland
浮游动物密度/(个/L) density of zooplankton	350	2 193	1 203	290	2 210	6 740
D	10.4 ^a	2.9 ^b	7.6 ^a	8.5 ^a	1.0 ^b	2.4 ^b

注:表中不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Notes: Different small letters of table indicate significant difference ($P < 0.05$).

优势种分析 应用优势度 Dominance (Y) 分析发现,2008、2009 年夏秋季节的大莲湖水源浮游动物的优势种主要有萼花臂尾轮虫 (*B. calyciflorus*)、短尾秀体溞 (*D. brachyurum*) 和近邻剑水蚤 (*C. vicinus*)。从优势种类组成来看,大莲湖水源浮游动物的优势种均为耐污染种类,也反映了大莲湖水源地的污染状态。

2.2 底栖动物的生物学指数分析

Shannon-Wiener 指数 (H_2) 与 Goodnight 修订指数 (G) 根据 2008、2009 年夏秋季节(6—10 月份)的调查数据,夏秋季节大莲湖水源地区域共检出底栖动物 15 种,隶属于 3 门 12 属。其中软体动物 7 属 9 种,寡毛类 3 属 4 种,摇蚊 2 属 2 种,分别占总种数的 60%、26.7% 和 13.3%。大

莲湖水源地不同区域水体中底栖动物的组成、分布与 Shannon Wiener 指数 (H_2) 与 Goodnight 修订指数 (G) 见表 3。

表 3 大莲湖水源地底栖动物分布和 Shannon-Wiener 指数与 Goodnight 修订指数
Tab.3 Shannon-Wiener index and Goodnight index of benthos in Dalianhu water source

	外河 external river	池塘 ponds	内河 inner river	湖区 lake	水森林 water forest	沼泽地 marshland
环棱螺属 <i>Bellamya</i>						
铜锈环棱螺 <i>B. aeruginosa</i>		+		+		
方形环棱螺 <i>B. purificata</i>	+	+	+	+		+
梨形环棱螺 <i>B. purificata</i>	+	+	+	+		+
角螺属 <i>Angulyagra</i>						
多棱角螺 <i>A. polyzonata</i>	+			+		
涵螺属 <i>Alocinma</i>						
长角涵螺 <i>A. longicornis</i>	+	+	+	+		
沼螺属 <i>Parafossarulus</i>						
中华沼螺 <i>P. sinensis</i>	+			+		
股蛤属 <i>Limnoperna</i>						
淡水壳菜 <i>L. lacustris</i>	+			+		
珠蚌属 <i>Unio</i>						
圆顶珠蚌 <i>U. douglasiae</i>	+			+		
无齿蚌属 <i>Anodonta</i>						
河无齿蚌 <i>A. fluminea</i>				+		
环节动物 <i>Annelida</i>						
水丝蚓属 <i>Limnodrilus</i>						
克拉泊水丝蚓 <i>L. claparedeianus</i>	+	+		+	+	
霍甫水丝蚓 <i>L. hoffmeisteri</i>	+	+		+	+	
尾鳃蚓属 <i>Branchiura</i>						
苏氏尾鳃蚓 <i>B. sowerbyi</i>	+		+	+	+	
颤蚓属 <i>Tubifex</i>						
正颤蚓 <i>T. tubifex</i>						
节肢动物 <i>Arthropoda</i>						
摇蚊属 <i>Chironomus</i>						
黄色羽摇蚊 <i>C. flaviplumus</i>	+			+	+	+
二叉摇蚊属 <i>Dicrotendipes</i>					+	
淡绿二叉摇蚊 <i>D. pelochloris</i>						
合计	11	6	4	12	5	3
H	1.23	0.91	0.81	1.26	0.97	0.92
G	0.88 ^a	0.67 ^a	0.75 ^a	0.75 ^a	0.40 ^b	0.30 ^b

注:表中不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Notes: Different small letters of table indicate significant difference ($P < 0.05$).

从表 3 看出,大莲湖水源地不同区域底栖动物的组成有较大差异,其中湖区和外河中的底栖动物的种类较多,而池塘和沼泽地的底栖动物种类较少。

底栖动物 Shannon Wiener 指数 (H_2) 分析显示,大莲湖不同区域水体中底栖动物 Shannon Wiener 指数 (H_2) 的变动范围为 0.81 ~ 1.26。其中,湖区最高 (1.26), 水产养殖池塘最低 (0.81)。按照 Shannon Wiener 多样性指数水体

污染评价指标,大莲湖水源地的水产养殖池塘、内河、水森林、沼泽地污染较重,外河和湖区污染较轻。

应用底栖动物 Goodnight 修订指数 (G) 分析发现,大莲湖水源地不同区域底栖动物的 Goodnight 修订指数 (G) 为 0.30 ~ 0.88。其中,沼泽地水体中底栖动物的 Goodnight 修订指数 (G) 最低 (0.30), 外河最高 (0.88), 水源地整体平均为 0.63。按照 Goodnight 评价结果,水森林、沼泽

地、池塘污染较重,其他区域污染较轻,整体呈中度污染状态。

密度与综合生物学污染指数(BPI) 调查数据显示,大莲湖水源地底栖动物的平均密度为 1 079 个/m²。其中,寡毛类为 2 655 个/m²,软体动物密度为 614 个/m²,摇蚊幼虫密度为 603 个/m²。大莲湖底栖动物的平均生物量为 475 g/m²。其中,软体动物的生物量为 472 g/m²,寡毛类为 10.3 g/m²,摇蚊幼虫生物量为 5.8 g/m²。在底栖生物密度组成中,寡毛类占 68%,软体动物和摇蚊幼虫各占 16%在生物量组成中,软体动物占 97%,寡毛类占 2%,摇蚊幼虫占 1%(图 2)。

根据密度组成和生物量组成,大莲湖水源地底栖生物的优势种为方形环棱螺(*B. purificata*)、梨形环棱螺(*B. purificat*)和长角涵螺(*A. longicornis*)。

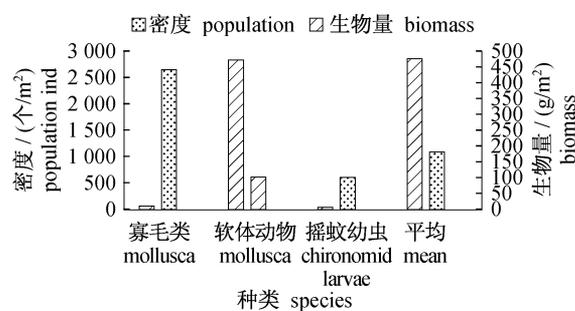


图 2 底栖动物密度与生物量组成

Fig. 2 Density and biomass of the benthos

应用底栖生物的综合生物学污染指数(BPI)分析发现,大莲湖水源地的整体生物学污染指数(BPI)为 1.1,显示呈中度污染状态。

2.3 水质特征

调查期间,对同期取样点的水质进行了分析,分析结果见(表 4)。

表 4 大莲湖水源地水质状况
Tab. 4 Water quality of Dalianhu water source

	水森林 water-forest	外河 external river	内河 inner river	池塘 ponds	湖区 lake area
TN	4.82 ± 1.57 ^a	2.06 ± 1.04 ^b	3.58 ± 1.23 ^a	3.44 ± 0.25 ^a	2.52 ± 0.94 ^b
NH ₄ ⁺ -N	0.97 ± 0.34 ^a	0.45 ± 0.22 ^b	0.57 ± 0.21 ^c	0.56 ± 0.14 ^c	0.35 ± 0.18 ^b
TSS	96.0 ± 11.2 ^a	135.0 ± 24.5 ^b	152.0 ± 32.5 ^c	165.0 ± 44.1 ^c	138.0 ± 25.5 ^b
TP	0.48 ± 0.04 ^a	0.09 ± 0.04 ^b	0.32 ± 0.09 ^a	0.28 ± 0.05 ^c	0.12 ± 0.02 ^b
COD _{Mn}	15.56 ± 1.23 ^a	6.78 ± 0.70 ^b	12.06 ± 0.98 ^b	8.97 ± 0.87 ^c	5.06 ± 0.34 ^c

注:表中不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Notes: Different small letters of table indicate significant difference ($P < 0.05$).

从表 4 看出,大莲湖水源地中水森林和养殖池塘水体的污染程度远高于外河和湖区。其中,水森林水体的 TN、TP、COD_{Mn} 浓度分别超过国家地表水水质标准 V 类水 2.4 倍、1.2 倍(水库、湖泊)和 1.03 倍;池塘水体中的 TN、TP 浓度分别超过国家地表水水质标准 V 类水 1.7 倍、1.4 倍以上。同时,大莲湖水源地中水森林、河道及养殖池塘的总悬浮物(TSS)浓度也较高,基本不适于人畜饮用或作为生活用水。按照地表水环境质量国家标准^[27],水森林、养殖池塘为劣 V 类水,湖区、河道水体为 IV ~ V 类水。

2.4 生物学指数与水质指标的相关性分析

为验证生物学指数与水质污染指标的关系,采用 SPSS statistics version 19.0 软件的 person 相关性分析方法,分析了不同生物学指数与水质指标之间的相关性(表 5)。

从表 5 看出,浮游动物的 Shannon Wiener 指数(H_1)与水体中的 TN、TP、COD 等的负相关,与

TSS 正相关。浮游动物的 Margalef 多样性指数(D)与 NH₄⁺-N、TN 显著负相关($P < 0.05$),与 TSS 正相关。浮游动物密度与 TN、TP、COD 正相关,与 TSS 负相关。浮游动物种类数与 TN、TP、COD 负相关,但不明显。表明水体中氮、磷污染越重,浮游动物多样性越小,种类越少,密度越大。从生物学指数与水质的相关性来看,使用浮游动物浮游动物的 Shannon Wiener 指数(H_1)和 Margalef 多样性指数(D)可以较好的反应水质状况。

底栖动物的 Shannon-Wiener 指数(H_2)与水体中的 TN、TP 和 COD 负相关。底栖动物的 Goodnight 修订指数(G)与水体中的 TN、TP 显著负相关($P < 0.05$);底栖动物的种类数与水体中的 NH₄⁺-N 显著负相关。从与水质的相关性来看,使用 Goodnight 底栖动物多样性修订指数(G)评价水质污染状态比 Shannon-Wiener 指数(H)更准确。

表 5 浮游动物和底栖动物生物学指数与水质指标的相关系数 (r)
Tab.5 Correlation coefficients of zooplankton and benthos' bio-indices with water quality

种类 species	指标 indices	总氮 TN	总磷 TP	化学耗氧量 COD	氨氮 NH ₄ ⁺ -N	亚硝氮 NO ₂ ⁻ -N	总悬浮物 TSS
浮游动物 zooplankton	H ₁	-0.854	-0.848	-0.520	-0.769	0.197	0.608
	D	-0.887*	-0.860	-0.849	-0.978**	0.155	0.746
	密度 density	0.857	0.861	0.753	0.781	0.509	-0.131
	种类数 species	-0.645	-0.608	-0.717	-0.817	-0.319	0.330
底栖动物 benthos	H ₂	-0.701	-0.749	-0.864	-0.689	-0.649	0.014
	G	-0.930*	-0.892*	-0.797	-0.519	-0.798	-0.211
	种类数 species	-0.824	-0.869	-0.792	-0.900*	-0.036	0.642

2.5 大莲湖水源地不同区污染状态综合分析

采用 SPSS statistics version19.0 软件的主成分分析方法,对污染生物学指数及水质指标进行分析,从主成分统计信息表(表 6)看出,因子 1 和因子 2 特征根均大于 1,且前 2 个因子累积贡献率达 94.595,基本包含了全部指标具有的数据信息,可以较准确地反映各区域的水质状况。考虑到结果分析时的便捷性,按 2 个主成分的方式重新计算,得到因子旋转载荷矩阵(表 6),以 0.7 为

分界点,则第一主成分涉及的因素总氮(TN)、总磷(TP)、化学耗氧量(COD)、氨氮(NH₄⁺-N)以及 Shannon Wiener 指数(H₁)、底栖动物的 Goodnight 修订指数(G),可以认为它们是水体污染的主成分,同时也反映出 Shannon Wiener 指数(H₁)、底栖动物的 Goodnight 修订指数(G)可以像水质污染指标一样反应水体污染状态。第二主成分涉及的因素主要有总悬浮物(TSS)与底栖动物的 Shannon Wiener 指数(H₂)。

表 6 主成分分析结果
Tab.6 Results of principal component analysis

特征根基方差贡献率 variance contribution of eigenvalues				综合主成分值 comprehensive component		
因子 component	特征根 eigenvalues	贡献率/% contribution of variance	累积贡献率/% cumulative contribution		第一主成分 F ₁ no. 1 component	第二主成分 F ₂ no. 2 component
1	7.039	78.216	78.216	TN	-.982	.120
2	1.474	16.379	94.595	TP	-.980	.153
3	.297	3.297	97.892	NH ₄ ⁺ -N	-.978	-.130
4	.190	2.108	100.000	COD	-.947	.046
5	3.020E-16	3.356E-15	100.000	G	.944	.187
6	1.812E-16	2.013E-15	100.000	H ₁	.936	.237
7	-7.836E-17	-8.707E-16	100.000	D	.882	-.236
8	-1.493E-16	-1.659E-15	100.000	TSS	.585	.810
9	-5.169E-16	-5.743E-15	100.000	H ₂	.614	-.783

综合评价分析显示(表 7),大莲湖水源地不同区域的水体污染程度依次为水森林 > 内河 > 池塘 > 外河 > 湖区。

表 7 大莲湖水源地污染状况综合评价
Tab.7 Comprehensive evaluation of pollution at Dalianhu water source

区域 area	第一主成分 F1 no. 1 component	排名 ranking	第二主成分 F2 no. 2 component	排名 ranking	综合主成分 F component	排名 ranking
池塘 ponds	0.211 43	3	0.933 23	1	0.318 226	3
水森林 water forest	1.289 13	1	-1.637 87	5	0.740 039	1
内河 inner river	0.498 28	2	0.618 99	2	0.491 119	2
外河 external river	-0.845 36	4	-0.129 90	4	-0.682 48	4
湖区 lake area	-1.153 48	5	0.215 55	3	-0.866 9	5

结合调查结果,水森林区域的污染主要是由于该区域有大量有机物沉积;内河污染主要是水源地的多数内河水流不畅,形成了污染淤积。水产养殖池塘中的污染主要是由于养殖过程中有大量的饲料投入;外河水体虽然来自太湖,但由于河中船舶较多,四周污染源流入也较多,水质状况自然不如湖区好。湖区由于有大量水草生长,净化功能较强,水质相对较好。综上分析表明,大莲湖水源地内部污染主要来自内部沉积和水产养殖。

3 讨论

目前,水质评价主要以水质监测数据为主要依据,生物评价应用很少,特别是在水环境管理领域^[34]。许多研究者认为,浮游动物个体小,对环境变化敏感,水环境的变化会直接影响其群落结构的生物效应,利用浮游动物作为水质变化的判断指标是可行的。实验表明,利用浮游动物的 Shannon Wiener 指数(H)和 Margalef 多样性指数(D)评价水体污染状况结果与水质评价结果相似,可以用来评价水体污染状态。

一些研究认为,底栖动物生活在水体底部,对底质环境敏感,是判断底质变化的重要指示种^[33]。由于浮游动物 Shannon Wiener 指数(H)受到温度、气候、土壤、水质等多因素影响,应用浮游动物 Shannon Wiener(H)指数评价水质,应该结合底栖动物区系组成和分布特点。从实验结果看,应用底栖动物的 Goodnight 修订指数(G)能更好的反应水体污染状态。

根据大莲湖的污染综合评价结果,大莲湖水源地的水森林、内河、池塘等污染程度超过外河和湖区,说明大莲湖水源地的水源净化功能已丧失,并成为污染源。为修复大莲湖环境,实现其水源地功能,应采取针对性的修复措施。通过开展地形塑造、底泥疏浚、水网沟通、控制池塘养殖等修复措施,恢复大莲湖水源地的功能。

参考文献:

- [1] 上海西郊淀山湖湿地生态修复总体概念性规划 [R]. 上海市园林设计院,2008:2-8.
- [2] 上海市黄浦江上游水源保护条例[N]. 上海市人民政府,1987:2-6.
- [3] 宋永昌. 淀山湖富营养化及其研究[M]. 上海:华东师范大学出版社,1992:2-16.
- [4] 万本太,徐海根,丁晖,等. 生物多样性综合评价方

法研究[J]. 生物多样性,2007,15(1):97-106.

- [5] 许木启. 从浮游动物群落结构与功能的变化看府河白洋淀水体的自净效果[J]. 水生生物学报,1996,20(3):212-220.
- [6] 沈韫芬,章宗涉,龚循矩,等. 微型生物监测新技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1990:1-524.
- [7] 刘超,禹娜,陈立侨,等. 上海市西南城郊河道春季的浮游生物组成及水质评价[J]. 复旦大学学报:自然科学版,2007,46(6):913-919.
- [8] 张丹,丁爱中,林学钰,等. 河流水质监测和评价的生物学方法[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2009,445(2):200-204.
- [9] 曾阳,付秀娥,苗明升,等. 基于大型浮游动物多样性与水质参数相关性分析的温榆河水质评价[J]. 生物毒理学报,2012,7(2):162-170.
- [10] Rosenberg D M, Resh V H. Introduction to freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates [M]. New York: Chapman and Hall,1993:488.
- [11] Throne R S J, Williams W P, Cao Y. The influence of data transformations on biological monitoring studies using macroinvertebrates [J]. Water Research,1999,33(2):343-350.
- [12] Clarke R T, Wright J F, Furse M T. RIVPACS models for predicting the expected macroinvertebrate fauna and assessing the ecological quality of rivers [J]. Ecological Modeling,2003,160(3):219-233.
- [13] Turak E, Flack L K, Norris R H, et al. Assessment of river condition at a large spatial scale using predictive models[J]. Freshwater Biology,1999,41(2):283-298.
- [14] Wilhm J L, Dorris T C. Biological parameters for water quality criteria[J]. Bioscience,1968,18(6):477-481.
- [15] 黄玉瑶,滕德兴,赵忠宪. 应用大型无脊椎动物群落结构特征及其多样性指数监测蓟运河污染[J]. 动物学集刊,1982(2):133-146.
- [16] 陆强国. 利用底栖动物的群落结构进行洞庭湖水质的生物学评价[J]. 环境科学,1985,6(2):59-63.
- [17] Hering D, Moog O, Sandin L. Overview and application of the AQEM assessment system [J]. Hydrobiologia,2004,516(1):1-20.
- [18] Pauw N D, Vanhooren G. Method for biological quality assessment of watercourses in Belgium [J]. Hydrobiologia,1983,100(1):153-168.
- [19] Rolauffs P, Stubauer I, Zahrdkovts, et al. Integration of the saprobic system into the European Union Water Framework Directive: case studies in Australia, Germany and Czech Republic [J]. Hydrobiologia,2004,516(1-3):285-298.
- [20] 金相灿,屠清璞. 湖泊富营养化调查规范[M]. 2

- 版. 北京: 中国环境科学出版社, 1995: 20 - 35.
- [21] 韩茂森, 束蕴芳. 中国淡水生物图谱 [M]. 北京: 海洋出版社, 1995: 56 - 90.
- [22] 蒋燮治, 堵南山. 中国动物志 (淡水枝角类) [M]. 北京: 科学出版社, 1979: 45 - 67.
- [23] 沈嘉瑞. 中国动物志淡水桡足类 [M]. 北京: 科学出版社, 1979: 55 - 87.
- [24] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究法 [M]. 北京: 科学出版社, 1991: 414.
- [25] 刘月英. 中国经济动物志 - 淡水软体动物 [M]. 北京: 科学出版社, 1959: 150 - 155.
- [26] Shannon C E, Weaver W. The mathematical theory of communication [M]. Urbana: University of Illinois Press, 1949: 213 - 216.
- [27] Margalef D R. Information theory in ecology [J]. *Generation Systems*, 1958, 3: 36 - 71.
- [28] Shannon C E, Wiener W J. The mathematical theory of communication [M]. Urbana: University of Illinois Press, 1999: 199 - 224.
- [29] 高磊. 淮河流域典型污染物多介质累积特征与生态风险评估 [D]. 上海: 华东师范大学, 2008: 56 - 78.
- [30] 魏复盛, 徐晓白, 阎吉昌, 等. 水和废水监测分析方法指南 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1994: 1 - 458.
- [31] 吕晋, 邬红娟, 林济东, 等. 主成分及聚类分析在水生态系统区划中的应用 [J]. *武汉大学学报*, 2005, 51(4): 461 - 466.
- [32] 龚路军, 张仕萍, 熊邦喜, 等. 不同类型湖泊夏季浮游生物多元聚类分析 [J]. *水生生物学报*, 2010, 34(1): 43 - 50.
- [33] 倪雪梅. 精通 SPSS 统计分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 220 - 259.
- [34] 吴东浩, 王备新, 张咏, 等. 底栖动物生物指数水质评价进展及在中国的应用前景 [J]. *南京农业大学学报*, 2011, 34(2): 129 - 134.

Pollution analysis and characteristics of pollution biology at Dalianhu water source based on zooplankton and benthos

LIU Xingguo^{1,2*}, XU Hao^{1,2}, ZHU Hao², WANG Xiaodong²

(1. Key Laboratory of Fishery Equipment and Engineering of Ministry of Agriculture, Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China;

2. Ponds Ecological Engineering Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 201606, China)

Abstract: Pollution biology indices on zooplankton and benthos were used to analyze the pollution state of different areas of Dalianhu water source, in order to study the pollution characteristics of Dalianhu water source. The evaluation effects of different biological indices on water pollution were considered with its water quality indices, and principal component analysis was used to analyze its pollution characteristics comprehensively. The results showed, during summer and autumn, the range of Shannon-Wiener index (H_1) and Margalef diversity index (D) of zooplankton in different areas of Dalianhu water source was 0.3 - 1.8 and 1.0 - 10.4, respectively; and the range of Shannon-Wiener index (H_2) and Goodnight index of benthos (G) was 0.81 - 1.26 and 0.30 - 0.88, respectively, which all showed it were in pollution. Correlation analysis results was in comparison with the water quality indices, showing the Margalef diversity index (D) of zooplankton and Goodnight index (G) of benthos can reflect the water pollution state preferably. Combined with the results through principal component analysis, the rank order of pollution state of different areas of Dalianhu water source was water-forest > inner river > ponds > external river > lake area. The results showed the lake area of Dalianhu water source had certain ability to purify and protect water, and the pollution was mainly from interior sedimentation of organic matter and pond aquaculture. The ecological restoration measures for Dalianhu water source should include reshaping the terrain, sediment dredging, communicating water network, controlling pond aquaculture, and so on.

Key words: zooplankton; benthos; biology indices; pollution characteristics

Corresponding author: LIU Xingguo. E-mail: liuxg1223@163.com