

南四湖底栖动物群落结构特征及其与环境因子的关系*

董贯仓, 李秀启**, 师吉华, 刘 峰, 客 涵, 刘 超
(山东省淡水水产研究所, 济南 250013)

摘 要: 为了解南四湖大型底栖动物群落结构特征及其与环境因子的关系, 于 2010 年对南四湖 15 个采样点的底栖动物和生态环境进行 4 次调查研究. 结果表明: 共检出底栖动物 23 种, 栖息密度和生物量为 311.57 ind./m^2 和 44.39 g/m^2 ; 群落物种优势度指数较高, 优势种集中于羽摇蚊幼虫 (*Chironomus plumosus*) 和霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*), 分别占个体总数的 77.45% 和 11.39%; 水生植物生物量为 1613 g/m^2 , 盖度为 33%, 存在显著季节变化与空间差异, 但底栖动物群落特征与之无显著相关性; 南四湖水域主要污染物为氮, 其次为磷, 最后为高锰酸钾指数; 2010 年度除底栖动物物种数与水体 COD_{Mn} 含量呈显著负相关以及栖息密度与水体相关加权综合营养状态指数呈显著正相关外, 其余底栖动物群落特征与水生植物、水质理化指标及营养状态间均未表现出显著相关性; 依据底栖动物 Goodnight-Whitley 生物指数和水质相关加权综合营养状态指数评价结果, 南四湖除局部区域受到严重的外源污染外, 总体为清洁—中度营养类型.

关键词: 底栖动物; 群落结构; 环境因子; 南四湖

Community characteristics of macrozoobenthos and its relationship to environmental factors in Lake Nansi

DONG Guancang, LI Xiuqi, SHI Jihua, LIU Feng, KE Han & LIU Chao
(Freshwater Fisheries Research Institute of Shandong Province, Jinan 250013, P. R. China)

Abstract: To understand the community characteristics of macrozoobenthos and its relationship to environmental factors in Lake Nansi, the species composition, inhabit density, biomass, dominant species, the conditions of aquatic plants and water quality were investigated in June 2010. There were 23 species of macrozoobenthos with the inhabit density of 311.57 ind./m^2 and biomass of 44.39 g/m^2 . The dominance index was relative high, and the dominant species consist of *Chironomus plumosus* and *Limnodrilus hoffmeisteri* which were accounted for 77.45% and 11.39% of the total individuals, respectively. The biomass and coverage of aquatic plants were 1613 g/m^2 and 33%, and there was no significant correlation between the biomass of aquatic plants and the community characteristics of macrozoobenthos. Lake Nansi was polluted majorly by nitrogen, next by phosphorus and finally by COD_{Mn} . The community characteristic of macrozoobenthos was not significantly correlated with the community characteristics of aquatic plant and with the water quality. The number of macrofaunal species was significantly negative correlated with the concentration of COD_{Mn} of water, and the inhabit density of macrozoobenthos was significantly positive correlated with the $TLI(\Sigma)$ of water in 2010. According to evaluation of Goodnight-Whitley index and $TLI(\Sigma)$, Lake Nansi has been in the state of clean and mesotropher, but serious pollution in some water areas.

Keywords: Macrozoobenthos; community characteristics; environmental factors; Lake Nansi

在淡水湖泊中, 大型底栖动物主要由软体动物、环节动物和水生昆虫等类群组成, 是湖泊生态系统的重要组成部分, 其物种多样性对维持湖泊生态系统结构和功能具有重要作用. 底栖动物在取食浮游生物、底栖藻类和有机碎屑的同时, 自身又被其它鱼类取食, 直接或间接地影响其它生物的生存和繁殖, 在湖泊生态系统能流和物质循环中起着承上启下的作用^[1]; 同时, 底栖动物能够加速水底有机碎屑的分解, 调节沉积物与

* 山东省渔业资源修复项目和山东省科技攻关项目联合资助. 2011-12-13 收稿; 2012-04-12 收修改稿. 董贯仓, 男, 1980 年生, 博士, 助理研究员; E-mail: dgc3869676@163.com.

** 通信作者; E-mail: lixiuqi2004@yahoo.com.cn.

水界面的物质交换,促进水体自净^[2-3];此外,底栖动物寿命较长,迁移能力有限,其生长、繁殖、群落演替和群落结构的变化与水环境因子有着密切的关系,水质、水深、水温、底质和高等水生植物分布等环境因子影响着底栖动物种类的分布^[4-7].由于底栖动物特殊的生物习性,其对环境变化反应敏感,常被作为环境监测的指示生物在水体富营养及水环境监测和评价方面得到应用^[1,8-9].底栖动物独特的优越性,亦使其近年来常被作为水域生态监测和生态系统健康评估的重要指标,广泛应用于湖泊环境监测^[10-14].

底栖动物群落结构与湖泊水质及生态系统健康状况关系密切.在南四湖,山东大学鱼类学教研组于1959年曾对底栖动物进行了初步调查^[15],王育峰^[16]和王健鹏^[17]分别于1983—1984年对渔业资源进行了调查研究,王崇江等^[18]也对底栖动物进行了定量调查,李金金等^[19]对微山湖小型底栖动物进行了报道.但是,以往有关底栖动物群落的研究主要集中于底栖动物资源现状及生物学特征方面,而有关湖泊底栖动物群落与环境及生态系统关系的研究较少.近年来,南四湖环境发生了巨大变化,相关湖泊水环境治理和水域资源养护体制亦发生了转变,有必要对大型底栖动物群落结构特征及其动态与湖泊水域环境及生态系统的关系进行研究.本文根据2010年在南四湖生境调查中获得底栖动物样品,对大型底栖动物的分布及其与水域环境和水生植物状况的关系进行了矩阵分析,以期对南四湖生态系统进行深入了解.

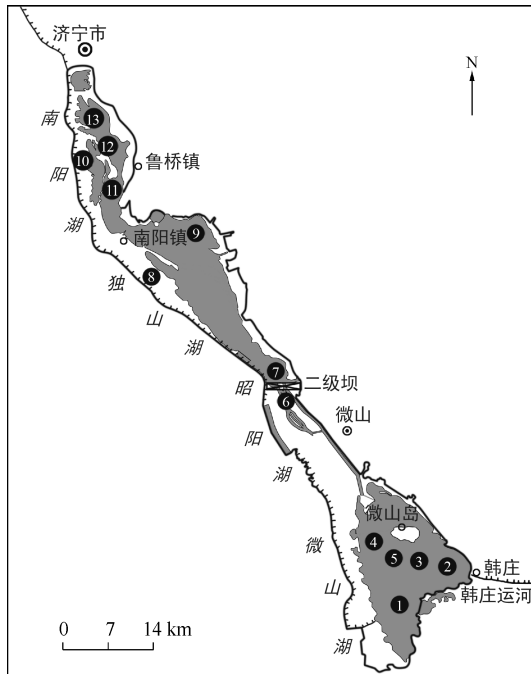


图1 南四湖调查采样点设置

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Lake Nansi

(COD_{Mn})、TN、TP 和 Chl. a 等项目均按文献[20]要求,现场固定、保存,带回室内分析.各项目检测方法按照文献[21-23]中要求的方法检测.

挺水植物采用收割法采样,深水体用 40 cm × 20 cm 的采草器采样.截取 1 m × 1 m 样方面积,将样方内全部植物连根夹起,及时冲洗干净并称量其湿重.并用目测法估算其盖度.

1.3 数据处理与分析

用种数(S)、密度(d)、生物量(B)、优势度指数(Y)、Shannon-Wiener 指数(H')、Margalef 指数(D)和 Goodnight-Whitley 指数(I_{CW})对大型底栖动物群落特征进行分析;用生物量(PB)和盖度(PC)对水生植物状况进行分析;依据水质指标采用加权营养状态指数法($TLI(\Sigma)$)对湖泊水质状况进行评价.

1 材料与方法

1.1 采样点设置

依据地理方位、汇入河流及湖区开发利用情况,在南四湖内设立 15 个采样点(图1),基本涵盖了主要入湖河流汇入区域、二级坝上下区域、湖区围网与网箱养殖区域、天然湖区及自然保护区等类型及不同利用方式湖泊区域.分别于2010年4、6、9和11月对湖泊水域的水质、水生植物及大型底栖动物状况进行定量调查.

1.2 样品采集与测定方法

底栖动物的采集用 1/16 m²改良型彼得森采泥器,每个采样点采集3次.泥样经 60 目分样筛洗后,剩余物置于白磁盘中将底栖动物活体逐一挑出,样品用 10% 福尔马林溶液保存.样品带回实验室鉴定至尽可能低的分类单元,统计各个分类单元的数量,然后用滤纸吸去表面固定液,置于电子天平上称重,最终结果折算成单位面积的密度和生物量.

水样的采集使用 5 L 有机玻璃采水器,采取表层约 0.5 m 深度的水样,现场测量水温(T)、透明度(SD)、pH、溶解氧(DO)等项目,化学需氧量

1.3.1 生物指数 种数(S)是大型底栖动物群落中的动物种类的数目,是最简单的多样性测定方法. 栖息密度(d)和生物量(B)分别从个体数量密度和生物量密度表示了底栖动物群落物种的丰富性.

优势度指数、Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数计算公式为:

$$Y = \frac{n_i}{N} \cdot f_i$$

(1)

$$H' = - \sum_{i=1}^S (n_i/N) \cdot \log_2 (n_i/N)$$

(2)

式中, n_i 为第*i*种物种的个体数, N 为样品总个体数, S 为种数, f_i 为第*i*种物种的出现频率. H' 数值的大小意味着群落多样性的高低:其值越大,多样性就越高;反之亦然.

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

(3)

Goodnight-Whitley 指数(I_{CW} , %):

$$I_{CW} = 100 \times (\text{寡毛类个体数} / \text{大型底栖动物个体数})$$

(4)

1.3.2 基于底栖动物生物多样性的环境质量评价标准 常用大型底栖动物的生物多样性指数和生物指数进行水质评价的标准见表 1.

1.3.3 基于水质指标的水域环境质量评价 以湖泊营养类型确定水域环境质量状况,采用相关加权综合营养状态指数进行评价.

2 结果与分析

表 1 利用大型底栖动物评价水质的标准

Tab. 1 The standard of water quality evaluated by macrozoobenthos' biodiversity index

评价指数	水质等级标准				
	最清洁	清洁	轻度污染	中度污染	重污染
H'	>3.5	2.5 ~ 3.5	2.0 ~ 2.5	1.0 ~ 2.0	<1.0
D	>3.5	2.5 ~ 3.5	2.0 ~ 2.5	1.0 ~ 2.0	<1.0
I_{CW}	<20	20 ~ 30	30 ~ 50	50 ~ 80	>80

2.1 底栖动物群落结构特征

2.1.1 种类组成 本次调查中共获得大型底栖动物 23 种,隶属于 4 门 6 纲. 其中:软体动物 10 种,环节动物 5 种,昆虫类 4 种,甲壳动物 3 种和脊索动物 1 种(表 2). 从物种优势度指数看,群落优势种集中,物种优势度指数较高. 依据徐兆礼等^[24] $Y > 0.02$ 的界定,优势种为羽摇蚊幼虫(*Chironomus plumosus*)和霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*),其优势度指数分别为 0.4571 和 0.0599,分别占到底栖动物个体总数的 74.45% 和 11.39%(表 2).

2.1.2 栖息密度 南四湖底栖动物栖息密度为 311.57 ind./m². 不同采样点栖息密度差异显著,其大小顺序为 13[#] > 11[#] > 9[#] > 8[#] > 6[#] > 10[#] > 15[#] > 3[#] > 14[#] > 7[#] > 1[#] > 5[#] > 12[#] > 2[#] > 4[#](图 2a);不同季节栖息密度亦存在显著差异,其大小顺序为 4 月 > 11 月 > 6 月 > 9 月(图 2b);此外,不同类群底栖动物栖息密度组成为昆虫类 > 寡毛类 > 软体动物 > 甲壳类 > 脊索动物.

2.1.3 生物量 南四湖底栖动物生物量为 44.39 g/m². 不同采样点生物量差异显著,其大小顺序为 8[#] > 6[#] > 15[#] > 2[#] > 11[#] > 7[#] > 13[#] > 1[#] > 9[#] > 3[#] > 10[#] > 14[#] > 5[#] > 12[#] > 4[#](图 3a);不同季节生物量亦存在显著差异,其大小顺序为 11 月 > 6 月 > 4 月 > 9 月;此外,不同类群底栖动物生物量组成为软体动物 > 昆虫类 > 甲壳类 > 寡毛类 > 脊索动物(图 3b).

2.1.4 生物多样性 调查发现,南四湖水域大型底栖动物物种数及多样性指数普遍较低(表 3). 底栖动物物种数最高为 15 种(8[#]),其次为 9 种(2[#]),再次为 11[#]和 15[#]的 7 种,然后为 1[#]和 7[#]的 6 种,其余采样点物种数均少于或等于 5 种,其大小顺序为 8[#] > 2[#] > 11[#]、15[#] > 6[#] > 1[#]、7[#] > 3[#]、5[#]、13[#] > 4[#]、9[#]、14[#] > 10[#]、12[#];不同季节物种数亦不同,其大小顺序为 4 月 > 6 月 > 11 月 > 9 月(表 3).

同时,生物多样性指数普遍不高,Shannon-Wiener 多样性指数为 1.53, Margalef 多样性指数为 1.89. 其中,Shannon-Wiener 和 Margalef 多样性指数均低于 2,且仅 1[#]、2[#]和 8[#]介于 1 ~ 2 之间,其余位点均低于 1. 由此可见,南四湖大型底栖动物群落生物多样性较差.

表 2 南四湖大型底栖动物的种类组成
Tab. 2 Community composition of macrozoobenthos in Lake Nansi

种类	优势度指数
软体动物	中国圆田螺(<i>Cipangopaludina chinensis</i>)
	0.0039
	铜锈环棱螺(<i>Bellamya aeruginosa</i>)
	0.0035
	梨形环棱螺(<i>Bellamya purificata</i>)
	<0.0001
	长角涵螺(<i>Alocinma longicornis</i>)
	0.0004
	耳萝卜螺(<i>Radix auricularia</i>)
	<0.0001
	河蚬(<i>Corbicula fluminea</i>)
	0.0001
甲壳类	射线裂脊蚌(<i>Schistodesmus lampreyanus</i>)
	<0.0001
	<圆顶珠蚌(<i>Unio douglasiae</i>)
	<0.0001
	背角无齿蚌(<i>Anodonta woodiana</i>)
	<0.0001
	方格短沟蜷(<i>Semisulcospira cancellata</i>)
	0.0001
	中华米虾(<i>Caridina denticulata sinensis</i>)
	<0.0001
	日本沼虾(<i>Macrobrachium nipponense</i>)
	<0.0001
昆虫类	秀丽白虾(<i>Exopalaemon modestus</i>)
	0.0001
	粗腹摇蚊幼虫(<i>Tanytus</i> sp.)
	0.0038
	羽摇蚊幼虫(<i>Chironomus plumosus</i>)
	0.4571
	蜻蜓幼虫(<i>Odonata</i> sp.)
	0.0001
	昆虫幼虫一种(<i>Insecta</i> sp.)
	<0.0001
寡毛类	霍甫水丝蚓(<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>)
	0.0599
	苏氏尾鳃蚓(<i>Branchiuro sowerbyi</i>)
	0.0005
	中华颤蚓(<i>Tubifex sinicus</i>)
寡毛类	宽体金线蛭(<i>Whitmania pigra</i>)
	0.0001
	宽身舌蛭(<i>Glossiphonia lata</i>)
	<0.0001
脊索动物	虾虎鱼一种 —
	<0.0001

高为 5[#]的 5277 g/m²;其次为 3[#]、11[#]和 1[#],介于 2000 ~ 2000 g/m²;再次为 13[#]、10[#]、6[#]、2[#]和 14[#],介于 1000 ~ 2000 g/m²;其余位点均低于 1000 g/m²,且 15[#]未采集到水生植物。

南四湖水生植物盖度不高(33%),各位点间差异显著,其大小顺序为 5[#] > 3[#] > 11[#] > 6[#] > 10[#] > 13[#] > 14[#] > 1[#] > 7[#] > 2[#] > 12[#] > 9[#] > 8[#] > 4[#] > 15[#],除个别位点外与生物量大小顺序基本一致。

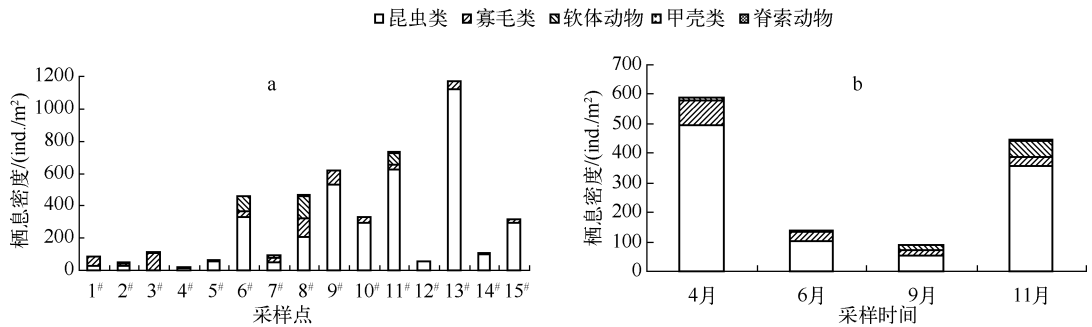


图 2 南四湖不同类群底栖动物栖息密度空间(a)和季节(b)变化
Fig. 2 Spatial(a) and seasonal (b) variations of the inhabit density of different kinds of macrozoobenthos in Lake Nansi

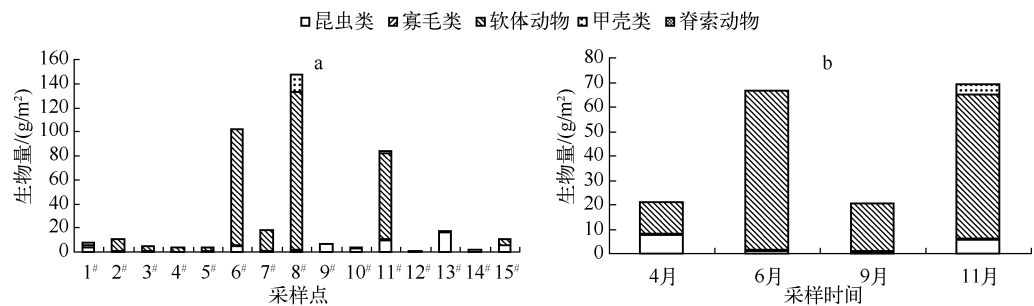


图3 南四湖不同类群底栖动物生物量空间(a)和季节(b)变化

Fig. 3 Spatial (a) and seasonal (b) variations of the biomass of different kinds of macrozoobenthos in Lake Nansi

表3 南四湖大型底栖动物生物多样性*

Tab. 3 The biodiversity of macrozoobenthos in Lake Nansi

位点	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]	9 [#]	10 [#]	11 [#]	12 [#]	13 [#]	14 [#]	15 [#]
S	5	9	4	3	4	6	5	15	3	2	7	2	4	3	7
H'	1.22	1.47	0.28	0.49	0.28	0.61	0.47	1.58	0.65	0.4	0.67	0.06	0.41	0.08	0.62
D	1.05	1.38	0.42	0.46	0.27	0.45	0.43	1.07	0.47	0.24	0.56	0.08	0.26	0.07	0.65

* 由于个别月份未采集到或仅采集到1种底栖动物,无法计算的月份生物指数赋值0进行年度计算。

2.3 水环境状况分析

调查中还南四湖水域的主要水质参数进行了调查研究,周年水质状况详见表6。根据《地表水环境质量标准》(GB/T 3838—2002)Ⅲ类水标准极限值规定,南四湖水域TP含量为0.05~0.44 mg/L,均值为0.12 mg/L,超过湖泊Ⅲ类水质标准,超标144%,属于V类水质,其中15[#]TP含量最高,超标776%;TN含量为2.16~5.54 mg/L,均值为2.93 mg/L,超过Ⅲ类水质标准,超标193%,属于劣V类水质,其中15[#]TN含量最高,超标454%;COD_{Mn}为7.13~10.17 mg/L,均值为7.33 mg/L,超过Ⅲ类水质标准,超标22%,属于Ⅳ类水质,其中15[#]COD_{Mn}最高,超标70%;SD为0.31~1.03 m,均值为0.67 m,最低值出现在14[#],最高值出现在8[#],据SD评分确定南四湖少数水域属富营养及轻度营养,大部分属中营养类型;Chl. a含量为2.07~32.61 mg/m³,均值为8.75 mg/m³,为中营养类型。由此可知,南四湖主要污染物为氮,其次为磷,最后为高锰酸钾指数。从湖泊水质检测及评价结果可知,南四湖水体为中营养类型。

2.4 底栖动物群落特征与湖泊环境因子的关系

根据底栖动物群落结构和环境因子在不同时间、不同位点的分布状况,建立了底栖动物群落结构与环境因子间的散点关系及相关矩阵分析(图4,表7)。

6月份南四湖底栖动物栖息密度(*d*)与水体中Chl. a含量呈显著正相关($P < 0.05$)、9月份生物量(*B*)与水体TN含量呈显著负相关($P < 0.05$)、2010

表4 南四湖水域主要水生植物组成

Tab. 4 Community composition of the main aquatic plants in Lake Nansi

科	物种
禾本科	芦苇(<i>Phragmites communis</i>)
	茭白(<i>Zizania caduciflora</i>)
香蒲科	水烛(<i>Typha angustifolia</i>)
睡莲科	莲(<i>Nelumbo nucifera</i>)
菱科	菱(<i>Trapa quadrispinosa</i>)
龙胆科	苕菜(<i>Nymphoides peltatum</i>)
雨久花科	凤眼莲(<i>Eichhornia crassipes</i>)
苋科	空心莲子草(<i>Alternanthera philoxeroides</i>)
水鳖科	轮叶黑藻(<i>Hydrilla verticillata</i>)
	苦草(<i>Vallisneria spiralis</i>)
	水鳖(<i>Hydrocharis dubia</i>)
眼子菜科	菹草(<i>Potamogeton crispus</i>)
	篦齿眼子菜(<i>Potamogeton pectinatus</i>)
	微齿眼子菜(<i>Potamogeton maackianus</i>)
	光眼眼子菜(<i>Potamogeton lucens</i>)
	马来眼子菜(<i>Potamogeton malaianus</i>)
金鱼藻科	金鱼藻(<i>Ceratophyllum demersum</i>)
小二仙草科	穗花狐尾藻(<i>Myriophyllum spicatum</i>)

年度底栖动物物种数(S)与水体 COD_{Mn} 含量呈显著负相关以及栖息密度(d)与水体相关加权综合营养状态指数($TLI(\Sigma)$)呈显著正相关($P < 0.05$);但是,其余底栖动物物种数(S)、栖息密度(d)和生物量(B)与水域环境质量间并未表现出显著相关性($P > 0.05$);此外,底栖动物群落结构特征亦未表现出与水生植物的相关性($P > 0.05$)(表7).

表5 南四湖不同位点水生植物分布
Tab. 5 Distribution of aquatic plants in different sampling sites in Lake Nansi

采样点	4月		6月		9月		11月		平均值	
	生物量/ ($\times 10^3 \text{ g/m}^2$)	盖度/ %	生物量/ ($\times 10^3 \text{ g/m}^2$)	盖度/ %	生物量/ ($\times 10^3 \text{ g/m}^2$)	盖度/ %	生物量/ ($\times 10^3 \text{ g/m}^2$)	盖度/ %	生物量/ ($\times 10^3 \text{ g/m}^2$)	盖度/ %
1 [#]	1842	35	3125	40	2748	30	1243	15	2240	30
2 [#]	938	25	1750	25	2305	30	1384	15	1594	24
3 [#]	2342	65	4125	80	3647	60	1435	20	2887	56
4 [#]	200	5	300	5	500	10	0	0	250	5
5 [#]	4548	70	9750	95	4763	60	2046	30	5277	64
6 [#]	1374	50	2431	65	2144	55	626	20	1644	48
7 [#]	481	25	738	30	1032	30	493	15	686	25
8 [#]	158	15	468	20	273	15	0	0	225	13
9 [#]	384	20	1149	30	1328	30	349	10	803	23
10 [#]	2167	60	3687	70	1186	50	176	10	1804	48
11 [#]	369	55	5187	70	4693	60	774	15	2756	50
12 [#]	542	25	831	30	991	30	59	5	606	23
13 [#]	2316	55	2850	65	1842	45	747	15	1939	45
14 [#]	1842	50	3275	70	694	35	106	5	1479	40
15 [#]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
平均值	1300	37	2644	46	1876	36	629	12	1613	33

表6 2010年南四湖水体质量状况
Tab. 6 Water quality of Lake Nansi in 2010

采样点	$\text{COD}_{\text{Mn}}/(\text{mg/L})$	$\text{TN}/(\text{mg/L})$	$\text{TP}/(\text{mg/L})$	$\text{Chl. a}/(\text{mg/m}^3)$	SD/m
1 [#]	8.71	2.29	0.10	16.89	0.38
2 [#]	7.13	2.53	0.14	4.48	0.40
3 [#]	7.85	2.47	0.05	8.70	0.61
4 [#]	8.33	2.65	0.07	2.07	0.70
5 [#]	8.38	2.69	0.10	3.97	0.83
6 [#]	8.44	2.28	0.08	3.80	0.96
7 [#]	8.75	2.27	0.09	3.57	0.88
8 [#]	7.80	2.25	0.06	3.11	1.03
9 [#]	9.73	3.24	0.15	9.72	0.48
10 [#]	9.11	2.75	0.08	7.74	0.78
11 [#]	8.54	2.16	0.05	4.05	0.70
12 [#]	9.54	3.13	0.12	3.88	0.75
13 [#]	9.10	3.27	0.09	4.94	0.95
14 [#]	9.74	4.50	0.21	21.76	0.31
15 [#]	10.17	5.54	0.44	32.61	0.34
平均值	8.75	2.93	0.12	8.75	0.67

表 7 南四湖底栖动物群落结构特征与环境因子的相关矩阵分析

Tab. 7 Correlation matrix of macrozoobenthos community and environmental factors in Lake Nansi

		<i>PB</i>	<i>PC</i>	DO	COD _{Mn}	TN	TP	Chl. a	SD	<i>TLI</i> (Σ)
4 月	<i>S</i>	-0.108	-0.080	-0.139	-0.181	-0.025	0.053	-0.003	-0.250	0.031
	<i>d</i>	0.005	0.152	-0.374	0.341	0.055	-0.006	0.209	0.044	0.148
	<i>B</i>	0.066	0.044	-0.242	0.022	0.231	0.295	0.253	-0.363	0.330
6 月	<i>S</i>	-0.301	-0.466	-0.132	-0.542	0.000	-0.042	-0.289	0.106	-0.084
	<i>d</i>	-0.264	-0.161	-0.512	-0.119	0.135	0.347	0.597 *	-0.073	0.465
	<i>B</i>	0.011	-0.041	-0.192	-0.501	-0.016	-0.319	0.077	0.052	-0.220
9 月	<i>S</i>	0.337	-0.037	0.326	0.290	-0.307	0.200	0.201	-0.291	0.476
	<i>d</i>	0.344	0.307	0.344	0.140	-0.269	-0.177	-0.030	-0.197	0.433
	<i>B</i>	0.268	0.142	0.462	0.042	-0.559 *	-0.142	0.016	-0.255	0.306
11 月	<i>S</i>	-0.135	-0.128	-0.278	-0.146	-0.005	-0.228	-0.167	-0.100	-0.238
	<i>d</i>	0.020	0.097	-0.141	-0.213	-0.121	-0.409	-0.088	0.400	-0.118
	<i>B</i>	-0.176	-0.049	0.150	-0.204	0.295	-0.102	-0.021	0.111	-0.129
2010 年	<i>S</i>	-0.095	-0.116	0.004	-0.273 *	-0.216	-0.150	-0.108	0.059	0.105
	<i>d</i>	-0.128	-0.031	-0.159	-0.109	-0.114	-0.262	0.074	0.239	0.282 *
	<i>B</i>	-0.098	-0.113	-0.048	-0.070	-0.016	-0.195	-0.010	0.014	0.125

* 表示 $P < 0.05$.

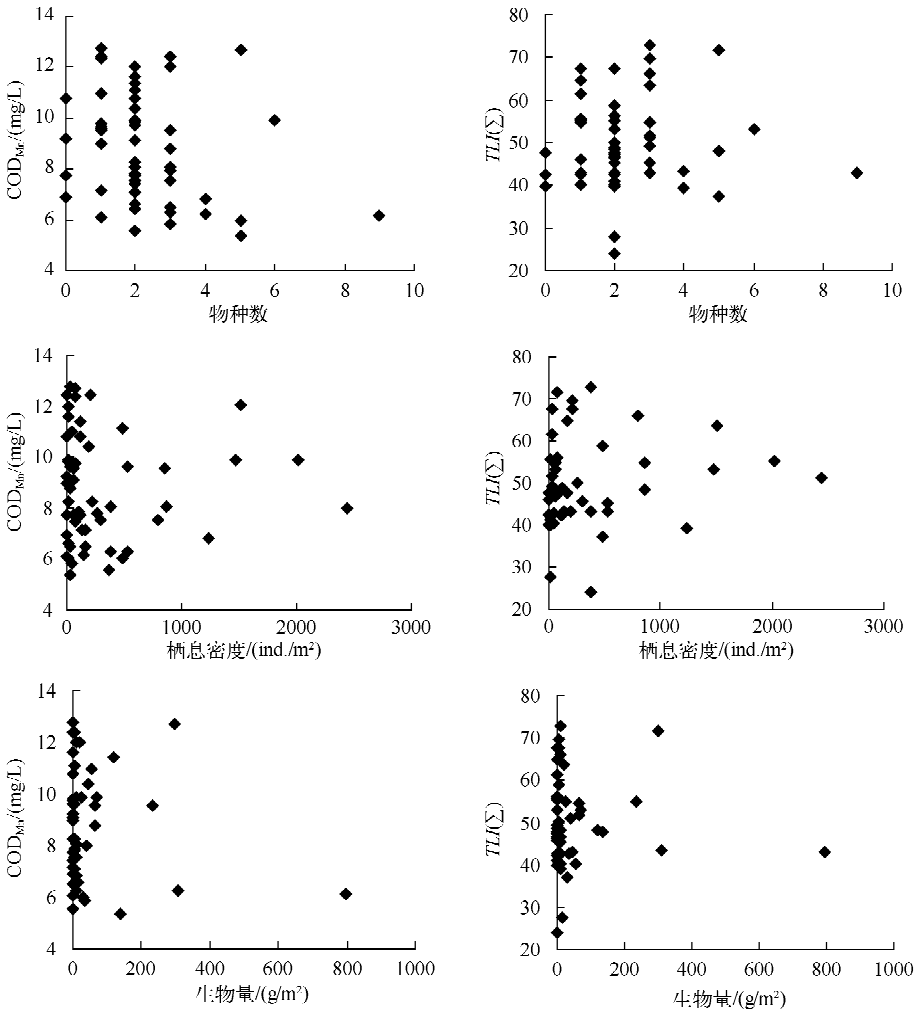


图 4 南四湖底栖动物群落结构特征与主要水环境因子的关系

Fig.4 The relationships between community structure characteristics of macrozoobenthos and the water quality in Lake Nansi

2.5 水域环境质量生物指数评价

根据底栖动物群落结构及水质指标的调查结果,基于大型底栖动物 Shannon-Wiener 和 Margalef 生物多样性指数的环境质量评价结果均为 20% 中度污染、80% 重污染,表明南四湖水域受到中度污染,整体环境质量较差;基于 Goodnight-Whitley 生物指数的环境质量评价结果则表明,40.00% 最清洁、13.33% 清洁、33.33% 轻度污染、13.34% 中度污染,南四湖水域多为清洁;此外,相关加权综合营养状态指数评价结果表明:2[#]、3[#]、4[#]、5[#]、6[#]、7[#]、8[#]、11[#]、12[#]和 13[#]为中度营养,占有位点的 66.67%;1[#]、9[#]和 10[#]为轻度富营养,占 20.00%;14[#]和 15[#]为中度富营养,占 13.33%;TLI(Σ)均值为49.45,南四湖整体为中度营养。

对 Shannon-Wiener、Margalef 和 Goodnight-Whitley 等 3 种生物指数及相关加权综合营养状态评价的相关性分析表明,除 Shannon-Wiener 和 Margalef 生物指数表现出显著相关性外($P < 0.05$),其它指数和评价结果间无显著相关性($P > 0.05$).而水域环境质量的生物指数评价结果相关性与之一致,除 Shannon-Wiener 和 Margalef 生物多样性指数的环境质量评价结果一致外,其它评价结果间差别较大。

由于基于底栖动物生物指数的环境质量评价所受影响因子的复杂性,结合水质评价结果,选择底栖动物 Goodnight-Whitley 生物指数法及相关加权综合营养状态评价的结果,南四湖除个别区域受到一定程度外源污染外,总体属清洁—中度营养状态。

3 讨论

近年来,南四湖富营养化趋势加重,水体、底泥—水界面、沉积物环境(非生物和生物环境)等环境显著改变,水生植物群落亦受到严重损坏,环境条件的恶化也导致底栖动物物种多样性的降低和群落结构的改变.当前调查中,作者共检出大型底栖动物 23 种,栖息密度和生物量分别为 311.57 ind./m² 和 44.39 g/m²,优势种群为羽摇蚊幼虫、霍甫水丝蚓.历史上曾对南四湖底栖动物进行过数次调查(表 9),与以往调查资料相比,当前南四湖底栖动物较 1960s^[15] 物种数相似,生物量和栖息密度增加,优势种由软体动物变成较小的寡毛类和昆虫类;而与 1990s^[16-18] 相比,物种数、生物量和栖息密度均显著降低,且优势种呈现进一步小型化.由于 1960s 的调查受诸如工具缺乏、设点不足、部分未定种未计入,以及其他纰漏等研究手段的限制,调查结果远低于底栖动物的现实存在量.与 1990s 相比,当前南四湖底栖动物物种数及现存量显著减少,优势种群亦由大型的软体动物逐渐转变为小型的水生昆虫和寡毛类。

表 8 南四湖底栖动物生物指数及环境质量评价*

Tab. 8 Biodiversity index values of macrozoobenthos and water quality assessment of Lake Nansi

采样点	Shannon-Wiener 指数		Margalef 指数		Goodnight-Whitley 指数		TLI(Σ)	
	指数值	水质等级	指数值	水质等级	指数值	水质等级	指数值	水质等级
1 [#]	1.22	中度污染	1.05	中度污染	59.32	中度污染	52.54	轻度富营养
2 [#]	1.47	中度污染	1.38	中度污染	35.63	轻度污染	47.81	中度营养
3 [#]	0.28	重污染	0.42	重污染	75.00	中度污染	42.08	中度营养
4 [#]	0.49	重污染	0.46	重污染	34.09	轻度污染	42.41	中度营养
5 [#]	0.28	重污染	0.27	重污染	<0.01	最清洁	47.14	中度营养
6 [#]	0.61	重污染	0.45	重污染	4.34	最清洁	44.56	中度营养
7 [#]	0.47	重污染	0.43	重污染	44.89	轻度污染	45.69	中度营养
8 [#]	1.58	中度污染	1.07	中度污染	18.91	最清洁	43.49	中度营养
9 [#]	0.65	重污染	0.47	重污染	43.08	轻度污染	52.27	轻度富营养
10 [#]	0.40	重污染	0.24	重污染	24.31	清洁	51.38	轻度富营养
11 [#]	0.67	重污染	0.56	重污染	2.53	最清洁	47.25	中度营养
12 [#]	0.06	重污染	0.08	重污染	50.00	轻度污染	47.75	中度营养
13 [#]	0.41	重污染	0.26	重污染	17.56	最清洁	49.33	中度营养
14 [#]	0.08	重污染	0.07	重污染	26.56	清洁	61.47	中度富营养
15 [#]	0.62	重污染	0.65	重污染	5.06	最清洁	66.60	中度富营养
平均值	1.53	中度污染	1.89	中度污染	15.45	最清洁	49.45	中度营养

* 个别月份未采集到或仅采集到 1 种底栖动物而无法计算生物指数的位点,其生物指数分别赋值 0 (Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数) 和 100 (Goodnight-Whitley 指数) 后进行年度生物指数计算。

表9 不同时期南四湖大型底栖动物群落结构特征
Tab. 9 Characteristics of community structure of macrozoobenthos in Lake Nansi during different periods

时间	物种数及种类组成	优势种	栖息密度/ (ind./m ²)	生物量/ (g/m ²)
1959 年 ^[15]	25 种. 其中环节动物 2 种、软体动物 17 种和节肢动物 6 种	软体动物中湖螺占绝对优势, 其次为淡水壳菜、椎实螺、杜氏珠蚌、鸟蛭、黄蛭等.	22.5	77
1983—1984 年 ^[16-17]	68 种. 软体动物 36 种、环节动物 8 种、节肢动物 9 种和昆虫纲 15 科	软体动物优势种为长角涵螺、纹沼螺、硬环棱螺和河蚬; 虾类以中华米虾最多; 摇蚊幼虫优势种为羽摇蚊和细长摇蚊.	931.59	92.65
1991 年 ^[18]	68 种. 软体动物 36 种、环节动物 8 种、节肢动物 9 种和昆虫纲 15 科	—	—	—
2010 年	23 种. 其中软体动物 10 种、环节动物 5 种、昆虫类 4 种、甲壳动物 3 种和脊索动物 1 种	羽摇蚊幼虫、霍甫水丝蚓	311.57	44.39

底栖动物群落结构的改变,与水域环境变化及人为干扰程度的加剧密不可分.已有研究表明,水域营养水平、底质类型及水生植物状况等直接或间接地影响着水域环境中底栖动物群落^[25-26].杨丽原等^[27]研究认为南四湖主要的营养来源为城市生活污水、农业退水和工业废水,并依据柱状沉积物中 TOC、TN 和 TP 含量将南四湖流域经济及入湖营养元素发展分为三个阶段:1978 年前为南四湖流域经济发展缓慢阶段,入湖营养元素相对稳定、缓慢变化;1978—1990 年,经济发展起步阶段,营养元素输入量开始增加;1991—2000 年,经济快速发展阶段,营养元素的输入增加较快.与之对应,1960s 南四湖流域经济发展缓慢,捕捞与养殖等人为扰动对南四湖的影响较弱,水域环境质量良好,底栖动物以软体动物等大型动物为主^[15];1990s 伴随经济社会发展,捕捞与养殖等人为干扰逐步加强,水域环境逐渐恶化,从而导致水生昆虫等小型耐污种的增加,导致了底栖动物较高的栖息密度^[16-17];自 19 世纪末,经济社会进入快速发展期,捕捞和增养殖等人为干扰严重影响了水域底栖动物群落,导致较大个体底栖动物种类的急剧减少,而水域环境继续恶化又加速了水生昆虫和水丝蚓等小型耐污种的进一步增加,并逐渐形成当前以小型的摇蚊幼虫和水丝蚓为优势种群的底栖动物群落.

水生植物作为湖泊系统的重要组成部分和主要的初级生产者之一,能够通过多种途径影响湖泊生态系统.一般认为,在浅水草型湖泊中,水草是影响底栖动物分布较为重要的环境因子^[28-30].大型沉水植物既为底栖动物提供了更加多样的生境,利于底栖动物生活、摄食和繁殖^[31-32],还为固着性藻类生长提供了附着表面,并富集有丰富的着生藻类、小型动物和有机碎屑,为水体中腹足类、昆虫类等底栖动物提供了丰富的饵料和栖息、繁殖场所;同时,茂盛水草的存在亦为底栖动物躲避鱼类及其它大型动物的掠食以及水流、风力的不利影响提供了避难场所^[30,33-34].因而,在水草区底栖动物生物量一般非常高^[35-36].但是,底栖动物对水草的反应还取决于各类动物的生活习性,如成体在底部生活的铜锈环棱螺数量随水草的增加反而减少.张波等也发现,蚌类、摇蚊幼虫和颤蚓类等营钻泥穴居习性的底栖动物与水草的关系并不密切^[37].本调查中,当前南四湖底栖动物优势种群主要为水生昆虫和寡毛类(摇蚊幼虫、霍甫水丝蚓),并且底栖动物群落结构与水生植物状况并未表现出显著相关性($P>0.05$,表 7),该结果进一步验证了张波等^[37]的研究结论.

传统生态学认为,空间的异质性及生境的复杂性决定了水域底栖动物群落的多样性^[24,38];同时,水域营养水平、底质类型及水生植物状况等也影响着水域环境中底栖动物群落^[24-26].位置不同湖区承载的环境压力、捕捞和养殖压力等人类活动的差异,造就了南四湖不同区域的空间异质性,亦导致了不同湖区底栖动物分布的空间差异,图 5 表明本调查中底栖动物栖息密度大小顺序为独山湖>南阳湖>昭阳湖>微山湖,生物量大小顺序为昭阳湖>微山湖>南阳湖>独山湖.Kitagawa 认为,湖体底部溶解氧水平是决定底栖动物分布的首要因素^[39].而在本调查中,底栖动物群落结构特征并未表现出与溶解氧的显著相关性($P>0.05$,

表 7), 可能与南四湖水位较浅、各湖区溶解氧水平无显著差异有关. 龚志军等^[40]和熊金林等^[41]对东湖和湖北 4 个不同污染程度湖泊底栖动物群落的研究均表明, 寡毛类的栖息密度分布与水体营养水平呈显著正相关. 蔡永久等对太湖的研究发现, 营养水平、底质类型及水生植物分布是决定大型底栖动物群落结构的关键因子^[42]. 姜莘红等认为汉阳湖的底栖动物总密度、颤蚓科、摇蚊幼虫及其优势种的密度或生物量与水体 TN、TP、叶绿素含量均呈极显著正相关($P < 0.01$), 且密度的相关性优于生物量^[14]. 李艳红等研究表明南四湖 4 个湖区的污染程度由重到轻为南阳湖 > 独山湖 > 微山湖 > 昭阳湖^[43]. 杨丽原等对南四湖上级湖沉积物的调查发现, 独山湖总氮含量最高, 南阳湖次之; 南阳湖总磷最高, 独山湖次之; 而昭阳湖相比另外两个湖区均最低^[27]. 本调查也发现 TN 含量大小顺序为南阳湖 > 独山湖 > 微山湖 > 昭阳湖, 南阳湖显著高于昭阳湖; TP 含量大小顺序为南阳湖 > 微山湖 > 独山湖 > 昭阳湖, 南阳湖显著高于其它. 调查中, 6 月份南四湖底栖动物栖息密度与水体中 Chl. a 含量和 2010 年度栖息密度与水体相关加权综合营养状态指数($TLI(\Sigma)$)间均呈显著正相关($P < 0.05$), 该结果与以上结论相符; 由于调查中优势种群为羽摇蚊幼虫、霍甫水丝蚓, 而寡毛类和水生昆虫能够直接利用腐殖质, 且水体中 TN、TP 等指标反映了湖泊的富营养状态和污染水平, 由此认为南四湖水质条件通过影响寡毛类和水生昆虫的栖息密度从而影响着底栖动物群落的空间分布特征.

龚志军等^[40]和熊金林等^[41]的研究还证明, 底栖动物种类数、物种多样性与富营养程度呈负相关. 但是在本调查中, 不同月份及年度底栖动物的群落结构特征多数未与水质状况表现出显著相关性(表 7), 该结果与以往研究结果的差异可能与底栖动物群落除受到水域环境状况影响外, 亦受到人类干扰和种间竞争等因素的制约. 当人类对水体进行渔业活动达到一定强度的规划, 就会对底栖动物产生影响, 如捕食作用会减少底栖动物的生物量^[44-45]; 吴庆龙对东太湖围网养鱼的研究表明, 围网养殖通过导致环境水质恶化进一步影响到湖泊的底栖动物群落^[46]; 许巧情的研究也表明当在水体中河蟹等捕食种类密度过大时, 底栖动物生物多样性明显下降, 密度和生产量亦减少 60% 以上, 特别是对小型螺类的影响尤为显著, 而该结果可能与河蟹的直接摄食及破坏水生植物造成的间接影响有关^[47]. 当前的南四湖湖区存在严峻的螺蛳采捕压力以及大面积的围网河蟹养殖等人类活动, 其中独山湖为四个湖区中水产养殖的发达地区, 湖区渔网密布; 而微山湖由于禁捕区和保护区的存在, 环境相对较好. 南四湖不同湖区底栖动物栖息密度大小顺序为独山湖 > 南阳湖 > 昭阳湖 > 微山湖, 生物量大小顺序为昭阳湖 > 微山湖 > 南阳湖 > 独山湖(图 5). 水质较差、人类活动压力较大的南阳湖和独山湖以摇蚊幼虫和寡毛类为优势种群, 具有较高的栖息密度和较低的生物量; 水质相对较好、人为保护较好的微山湖和昭阳湖则以软体动物较多, 具有相对较低的栖息密度和较高的生物量. 由此可见, 采捕与增养殖等人为活动及增养殖渔业生物的捕食等压力的差异, 亦是造成湖泊底栖动物群落结构差异的重要原因.

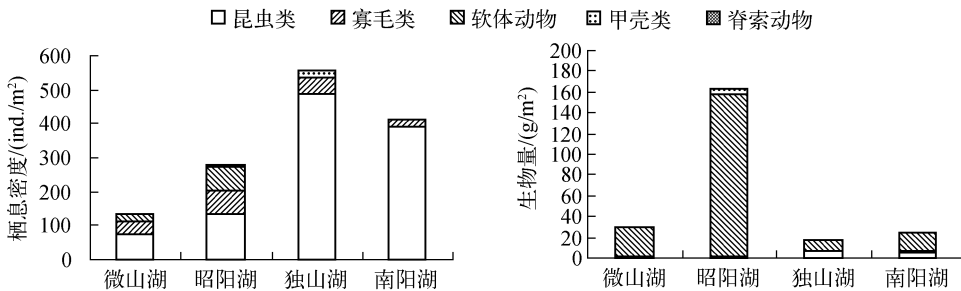


图 5 南四湖不同湖区大型底栖动物栖息密度和生物量的空间差异

Fig. 5 Spatial variations of the inhabit density and biomass of macrozoobenthos in different lake areas of Lake Nansi

对南四湖水域环境质量的评价结果, 基于 Shannon-Wiener 和 Margalef 多样性指数的评价结果基本一致, 表明南四湖水域受到中-重度污染, 整体环境质量较差; 基于 Goodnight-Whitley 生物指数与相关加权综合营养状态指数的评价结果相似, 除局部水域受到严重污染外, 南四湖总体处于清洁-中营养状态(表 8). 上述评价结果中, 前者与李艳红等^[43]的研究结论基本一致, 后者则与徐祖信等^[48]对南四湖富营养程度等级划分标

准相一致. 两者的巨大差异,可能与浅水湖泊中底栖动物的群落结构容易受到渔业活动的冲击,继而导致与底栖动物种类组成相关的生物学指标的波动有关. 首先,Shannon-Wiener 和 Margalef 多样性指数评价主要基于物种组成的多寡,容易受到其它非水质因子导致的物种数量变化的影响,南四湖的螺蛳捕捞及大面积网箱、围网养殖等人为活动可能对底栖动物群落产生巨大影响;其次,Goodnight-Whitley 生物指数评价主要基于污染环境底栖指示生物(寡毛类)的密度及比重,并且当前南四湖水域底栖动物的优势种群为寡毛类和水生昆虫类为主,Goodnight-Whitley 生物指数的评价针对性更强;第三,南四湖水质营养状况的调查结果与 Goodnight-Whitley 生物指数的评价结果除个别位点存在一定差异外,整体评价结果基本一致. 因此,认为 Goodnight-Whitley 生物指数和相关加权综合营养状态指数的评价结果更为准确地体现了南四湖水域的环境质量状况,但建议在评价过程中遵循互补原则利用该两种方法进行综合评价.

4 参考文献

- [1] Casellato S, Caneva F. Composition and distribution of bottom oligochaete fauna of a north Italian eutrophic lake (Lake Ledro). *Hydrobiologia*, 1994, **278**(1/2/3):87-92.
- [2] Gallepp GW. Chironomid influence on phosphorus release in sediment-water microcosms. *Ecology*, 1979, **60**(3):547-556.
- [3] Fukuhara H, Sakamoto M. Enhancement of inorganic nitrogen and phosphate release from lake sediment by tubificid worms and chironomid larvae. *Oikos*, 1987, **48**(3):312-320.
- [4] 王银东,熊邦喜,陈才保等. 环境因子对底栖动物生命活动的影响. 浙江海洋学院学报,2005,**24**(3):253-280.
- [5] 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. 水生生物学报,2007,**31**(2):174-182.
- [6] 章飞军,童春富,张 衡等. 长江口潮下带春季大型底栖动物的群落结构. 动物学研究,2007,**28**(1):47-52.
- [7] 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. 生物多样性,2008,**16**(3):288-297.
- [8] 龚志军,谢 平,阎云君. 底栖动物次级生产力研究的理论与方法. 湖泊科学,2001,**13**(1):79-88.
- [9] Diggins TP, Snyder R. Three decades of change in the benthic macroinvertebrate community and water quality in the Buffalo River area of concern, 1964—1993. *Journal of Great Lakes Research*, 2003, **29**(4):652-663.
- [10] Milbrink G. An improved environmental index based on the relative abundance of oligochaete species. *Hydrobiologia*, 1983, **102**(2):89-97.
- [11] Dévai G, Moldován J. An attempt to trace eutrophication in a shallow lake using chironomids. *Hydrobiologia*, 1983, **103**(1):169-175.
- [12] 邹红娟,崔 博,吕 晋等. 武汉湖泊底栖动物群落结构及水质生态评价. 华中科技大学学报:自然科学版,2005,**33**(10):96-98.
- [13] 谢志才,张君倩,陈 静等. 东洞庭湖保护区大型底栖动物空间分布格局及水质评价. 湖泊科学,2007,**19**(3):289-298.
- [14] 姜莘红,崔永德,王海军等. 汉阳湖群底栖动物群落及其对环境质量的指示. 长江流域资源与环境,2011,**20**(5):525-533.
- [15] 鱼类学教研组. 山东南四湖底栖动物初步调查. 山东大学学报,1960,(4):21-30.
- [16] 王育峰. 南四湖渔业资源调查综合报告(摘要). 淡水渔业,1986,(2):19-22.
- [17] 王健鹏. 南四湖的水生生物和渔业生态初析. 水产学报,1989,**13**(3):221-229.
- [18] 王崇江,王金文,沈昌汉等. 南四湖饲料资源调查及开发利用. 草与畜杂志,1991,(1):4-6.
- [19] 李金金,黄 勇. 微山湖小型底栖生物群落结构的初步研究. 聊城大学学报,2009,**22**(4):51-54.
- [20] 全国渔业自然资源调查和渔业区划淡水专业组. 内陆水域渔业自然资源调查试行规范,1980.
- [21] 中国标准出版社第二编辑室. 中国环境保护标准汇编:水质分析方法. 北京:中国标准出版社,2001.
- [22] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范:第2版. 北京:中国环境科学出版社,1990.
- [23] 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:第4版. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [24] 徐兆礼,陈亚瞿. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲈鲶渔场的关系. 生态学杂志,1989,**8**(4):13-15.
- [25] Shostell JM, Williams BS. Habitat complexity as a determinate of benthic macroinvertebrate community structure in cypress

- tree reservoirs. *Hydrobiologia*, 2007, **575**(1):389-399.
- [26] 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. 应用生态学报, 2010, **21**(8):2132-2139.
- [27] 杨丽原,沈吉,刘恩峰等. 南四湖现代沉积物中营养元素分布特征. 湖泊科学, 2007, **19**(4):390-396.
- [28] Xie ZC, Tang T, Ma K *et al.* Influence of environmental variables on macroinvertebrates in a macrophyte-dominated Chinese lake, with emphasis on the relationships between macrophyte heterogeneity and macroinvertebrate patterns. *Journal of Freshwater Ecology*, 2005, **20**(3):503-512.
- [29] Cyr H, Downing JA. The abundance of phytophilous invertebrates on different species of submerged macrophytes. *Freshwater Biology*, 1988, **20**(3):365-374.
- [30] Crowder LB, Cooper WE. Habitat structural complexity and the interaction between bluegills and their prey. *Ecology*, 1982, **63**(6):1802-1813.
- [31] Wiggins GB. Larvae of the North America caddisfly Genera (Trichoptera). 2nd ed. Toronto and Buffalo, New York: University of Toronto Press, 1996.
- [32] Nolte U, Hoffmann T. Life cycle of *Pseudodiamesa branickii* (Chironomidae) in a small upland stream. *Aquatic Ecology*, 1993, **26**(2/3/4):309-314.
- [33] Nelson WG. Experimental studies of selective predation on amphipods: consequences for amphipod distribution and abundance. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1979, **38**(3):225-245.
- [34] Coen LD, Hech KL, Abele LG. Experiments on competition and predation among shrimps of seagrass meadows. *Ecology*, 1981, **62**(6):1484-1494.
- [35] Soszka GJ. Ecological relations between invertebrates and submerged macrophytes in the lake littoral. *Ekologia Polska*, 1975, **23**(3):393-415.
- [36] Cherry DS, Guthrie RK. Significance of detritus or detritus-associated invertebrates to fish production in a new impoundment. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1975, **32**(10):1799-1804.
- [37] 张波,高兴梅,宋秀贤等. 芝罘湾底质环境因子对底栖动物群落结构的影响. 海洋与湖沼, 1998, **29**(1):53-60.
- [38] Tews J, Brose U, Grimm V *et al.* Animal species diversity driven by habitat heterogeneity/diversity: the importance of keystone structures. *Journal of Biogeography*, 2004, **31**(1):79-92.
- [39] Kitagawa N. A classification of Japanese lakes based on hypolimnetic oxygen and benthonic fauna. *Japanese Journal of Limnology*, 1978, **39**:1-8.
- [40] 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. 水生生物学报, 2001, **25**(3):201-216.
- [41] 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. 生物多样性, 2010, **18**(1):50-59.
- [42] 熊金林,梅兴国,胡传林. 不同污染程度湖泊底栖动物群落结构及多样性比较. 湖泊科学, 2003, **15**(2):160-168.
- [43] 李艳红,杨丽原,刘恩峰等. 南四湖富营养化评价与原因分析. 济南大学学报, 2010, **24**(2):212-215.
- [44] Post JR, Cucin D. Changes in the benthic community of a small precambrian lake following the introduction of yellow perch, *Perca flavescens*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 1984, **41**(10):1496-1501.
- [45] Gilinsky E. The role of fish predation and spatial heterogeneity in determining benthic community structure. *Ecology*, 1984, **65**(2):455-468.
- [46] 吴庆龙. 东太湖及其网围养鱼区的底栖动物以及环境质量的初步评价与区划. 海洋湖沼通报, 1991, (4):64-72.
- [47] 许巧情,王洪铸,张世萍. 河蟹过度放养对湖泊底栖动物群落的影响. 水生生物学报, 2003, **27**(1):41-46.
- [48] 徐祖信,姜亚萍. 湖泊营养状态的综合水质标识指数评价及检验. 同济大学学报, 2009, **37**(8):1044-1048.