
江西仙女湖流域大型 底栖动物群落结构及水质评价

李文浩¹ 张萌^{2,3} 门吉帅¹ 敖雪夫¹ 胡新艳¹ 欧阳珊¹ 吴小平^{1*}

(1. 南昌大学生命科学学院, 江西 南昌 330031;

2. 江西省环境保护科学研究院, 江西 南昌 330029;

3. 江西省环境保护工程技术研究中心, 江西 南昌 330029)

【摘要】以典型的亚热带大型山地丘陵湖泊——江西省仙女湖研究为例, 2014~2015年每月对仙女湖湖区及主要入湖河流进行了大型底栖动物群落的周年动态研究。经鉴定得底栖动物111种, 隶属3门53科77属。其中软体动物40种, 节肢动物61种, 环节动物10种。优势种为中华颤蚓、梨形环棱螺、河蚬、锯齿新米虾、羽摇蚊、粗腹摇蚊属、前突摇蚊属、霍甫水丝蚓。仙女湖大型底栖动物年平息栖息密度为346 ind./m², 年平均生物量为54.26 g/m²; 不同区域和季节底栖动物的栖息密度与生物量有显著差异($P < 0.05$), 河流型生境R2年平均栖息密度最大, 为722 ind./m²。湖泊型生境L4年平均栖息密度最小, 为251 ind./m²。1月的平均栖息密度最高, 为567 ind./m², 5月平均栖息密度最低, 为163 ind./m²。用辛普森多样性指数对不同区域水质进行评价, 结果表明, 入湖河流和铃阳湖为轻度污染, 舞龙湖为中度污染。系统聚类和MDS排序分析表明, 大型底栖动物的分布具有环境空间异质性, 可以划分为2个群落。

【关键词】大型底栖动物; 群落结构; 仙女湖; 流域; 周年动态; 水质评价

【中图分类号】 Q95

【文献标识码】 A

【文章编号】 1004-8227(2016)08-1218-10

收稿日期: 2015-11-16; **修回日期:** 2016-01-19

基金项目: 赣鄱英才555工程领军人才培养计划资助项目(18000041) [Ganpo Excellence 555 Engineering Funded Projects (18000041)]; 国家江河湖泊生态环境保护专项-仙女湖生态安全基线调查项目(JXHK14050015) [The National Special Project For Protecting the Environment and Ecosystems of Rivers & Lakes—The Project of the Ecological Security Baseline Survey on Lake Xiannv (JXHK14050015)]; 国家水体污染控制与治理科技重大专项子课题(2012ZX07501001-06) [Sub Topics of National Water Pollution Control and Governance (2012ZX07501001-06)]

作者简介: 李文浩(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大型底栖生物生态学. E-mail: jonkeeleee@qq.com

***通讯作者** E-mail: xpwu@ncu.edu.cn

大型底栖动物不仅在食物网具有多种功能,而且能够促进水体沉积物中碎屑的分解,在水生态系统中发挥着重要作用^[1]。大型底栖动物迁移能力有限,区域性较强,物种谱的水质响应关系具有明显规律性,能科学评估水质的安全性乃至深层次的污染问题,在国际上被广泛采用^[2],并形成多项国际公认的评估规范(US EPA)。深水人工湖库有别于浅水天然湖泊,其环境容量大,但系统发育时间短、相对脆弱和不稳定,往往肩负极为重要的饮用水源地功能和水源涵养功能。随着饮用水源安全问题已上升到战略高度,深水人工湖库的水质变化与富营养化发生过程亟待深度解析,以保障水生态系统稳定与健康,有效发挥其生态服务功能。

仙女湖(江口水库),位于北纬27° 33' ~28° 05', 东经114° 29' ~115° 24', 水面面积50 km², 湖库坝址控制流域面积达3900 km², 约占袁河流域总面积的60.13%, 平均水深12 m, 年平均蓄水量达3.2×10⁸ m³, 属不完全年调节湖泊型水库, 是我国南方一座亚热带大型的山地丘陵型湖泊。仙女湖不仅是著名的国家湖泊型风景名胜区, 还是江西省新余市50万人目前最主要的饮用水源地^[3,4], 本研究以仙女湖及其核心流域为研究对象, 采用周年调查的定位观测研究, 对大型底栖动物类群进行调查分析, 分析其群落结构及其水环境响应特征, 为该水库型湖泊的科学有效管理和建立优质生态湖泊保护机制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

仙女湖湖体共分为两个子湖和一条峡谷, 上游为铃阳湖, 下游为舞龙湖。中间连接峡谷为钟山峡, 约长 10 km。根据仙女湖核心流域生态环境及水文特点, 共设置 27 个采样点, 采用 UPGMA 聚类分析将仙女湖及其入湖河流分成铃阳湖湖区, 舞龙湖湖区上游, 舞龙湖湖湾区, 舞龙湖出水口, 铃阳湖入湖河流, 舞龙湖入湖河流 6 个区域(图 1, 表 1), 具体方法详见邹斌春(2015)^[5]。

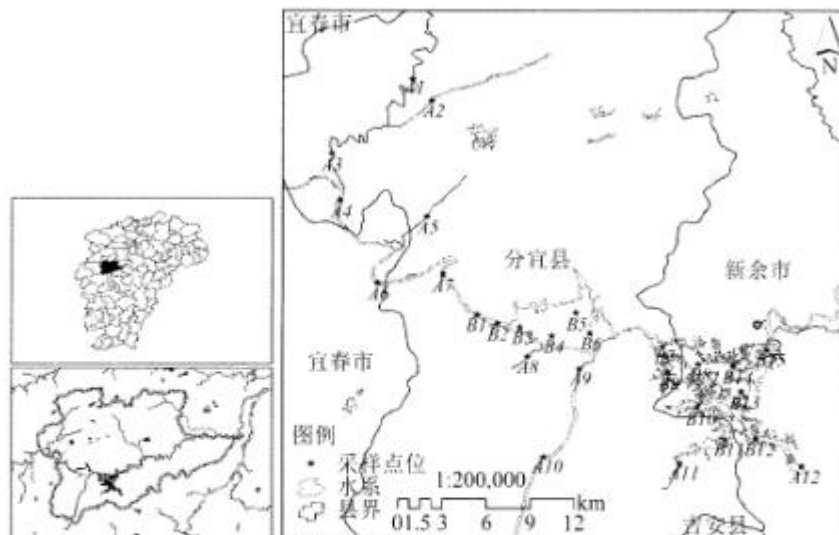


图 1 仙女湖流域核心区采样点分布图

Fig.1 Sketch of Sampling Sites in the Key Zone of Lake Xiannv Basin

表 1 采样点位置及环境特点

Tab.1 Classification and Environmental Factors of Lake Xiannv Basin

采样分区	点位	水温(℃)	水深(m)	电导率	叶绿素 a(μg/L)	pH	溶解氧 (mg/L)	氨氮 (mg/L)	总磷 (mg/L)	总氮 (mg/L)
L1(湖区)	B1, B2, B3 B4, B5, B6	18.63	3.11	251.00	26.85	7.90	6.36	0.31	0.04	1.11
L2(湖区)	B7, B8, B9	19.36	10.44	235.49	36.46	7.88	6.28	0.28	0.03	1.07
L3(湖区)	B10, B11, B12, B13	20.18	7.96	180.61	22.10	7.88	6.07	0.24	0.03	1.10
L4(湖区)	B14, B15	20.18	15.40	221.22	22.06	7.86	6.27	0.24	0.03	1.04
R1(入湖河流)	A1, A2, A3, A4, A5	17.42	0.89	292.84	4.96	7.68	6.27	0.45	0.07	1.21
R2(入湖河流)	A6, A7, A8, A9	17.21	0.82	194.66	7.99	7.28	5.82	0.93	0.19	2.00

1.2 样品采集与处理

2014年5月到2015年5月每月采样。定性标本为在浅水区用抄网采集，定量标本用面积为1/16 m²改良彼德生采泥器采集，泥样经40目(0.635 mm)筛网洗涤，经分拣后用10%福尔马林溶液固定，随后进行分类鉴定^[68]、个体计数和称重(0.000 1 g天平)。

1.3 优势种确定

采用如下公式计算底栖动物的优势度 $Y=(n_i/N) \times f_i$ ，公式中 n_i 为第 i 种的个体数， N 为所有种类总个体数， f_i 为出现率， Y 为优势度， $Y > 0.02$ 的种类定为优势种^[9]。

1.4 辛普森多样性指数

采用辛普森多样性指数对仙女湖不同区域水质进行评价。

辛普森多样性指数^[10] $D=1 - \sum (n_i/N)^2$ 。辛普森指数的最低值为0，最高值为1。D小于0.25为严重污染；0.25到0.50为重污染；0.50到0.75为中度污染；0.75以上为轻污。D值越高，水质越好^[11]。

1.5 数据分析

用R软件先将每个站点所有种类全年的平均丰度进行组间聚类分析和非度量多维标度排序MDS分析。

2 结果

2.1 种类组成及分布

本次调查共记录仙女湖流域核心区大型底栖动物111种(表 2)，隶属于3门54科77属。其中软体动物40种，占总种数的36.0%，节肢动物61种，占总种数的55.0%，环节动物10种，占总种数的9.0%。河流型生境中物种较丰富，河流型生境R1区域(A1-A9采样点)记录到105种，河流型生境R2区域(A10-A12 采样点)记录到68种，库区生境物种相对较少，湖泊型生境L1区域(B1-B6采样点)记录到34种，湖泊型生境L2区域(B7-B9采样点)出现11种，湖泊型生境L3区域(B10-B13采样点)出现11种，湖泊型生境L4区域(B14-B15采样点)出现7种。

2.2 现存量及时空变化

2.2.1 栖息密度

仙女湖大型底栖动物年平均栖息密度为 346.29 ind./m²。不同区域底栖动物的栖息密度有显著差异($P<0.05$)，从不同生境看，河流型生境(R1, R2)均栖息密度相对较高，年平均栖息密度为 588.91 ind./m²。(湖泊)湖泊型生境(L1, L2, L3 和 L4)较低，年平均栖息密度为 298.30 ind./m²。就一年不同月份而言，冬春季(1 至 4 月)的略高，平均栖息密度为 507.44 ind./m²，可能与该时期水位低有关；秋季相对较低(9 月至 11 月)，平均栖息密度为 265.13 ind./m²。2015 年 5 月平均栖息密度最低，为 163.49 ind./m² (图 2)，可能由于处于丰水期，水位升高不利于螺类和水生昆虫生存。

表 2 仙女湖流域核心区大型底栖动物种类与分布

Tab.2 Spices Composition and Distribution Pattern of Macrozoobenthos in the Key Zone of Lake Xiannv Basin

物种	R1	R2	L1	L2	L3	L4
方形环棱螺 <i>Bellamya quadrata</i>	+	+	+			
铜锈环棱螺 <i>Bellamya aeruginosa</i>	+	+	+			
梨形环棱螺 <i>Bellamya purificata</i>	+	+	+			
包氏环棱螺 <i>Bellamya bottgeri</i>	+		+			
耳河螺 <i>Rivularia auriculata</i>	+		+			
卵河螺 <i>Rivularia ovum</i>			+			
中国圆田螺 <i>Cipangopaludina chinensis</i>	+					
大瓶螺 <i>Pila gigaa</i>	+	+				
长角涵螺 <i>Alocinma longicornis</i>	+	+				
纹沼螺 <i>Parafossarulus striatulus</i>	+		+			
中华沼螺 <i>Parafossarulus sinensis</i>	+	+				
大沼螺 <i>Parafossarulus eximius</i>	+	+	+			
瘦沼螺 <i>Parafossarulus woodi</i>	+	+				
堇拟沼螺 <i>Assiminea violacea</i>	+					
方格短沟蜷 <i>Semisulcospira cancellata</i>	+	+	+			
格氏短沟蜷 <i>Semisulcospira gredler</i>	+	+	+			
塔锥短沟蜷 <i>Semisulcospira henriatae</i>	+					
多瘤短沟蜷 <i>Semisulcospira polyoma</i>	+					
光滑狭口螺 <i>Stenothyra glabra</i>	+	+				
尖膀胱螺 <i>Physa acuta</i>	+	+	+			
耳萝卜螺 <i>Radix auricularia</i>	+		-			
折叠萝卜螺 <i>Radix plicatula</i>	+		+			
椭圆萝卜螺 <i>Radix swinhoei</i>	+	+				
尖萝卜螺 <i>Radix acuminata</i>	+					
狭萝卜螺 <i>Radix lagotis</i>	+					
梯旋萝卜螺 <i>radix latispira</i>	+					
凸旋螺 <i>Gyraulus convexiusculus</i>	+	+				
扁旋螺 <i>Gyraulus compressus</i>	+	+				

大脐圆扁螺 <i>Hippeutis umbilicalis</i>	+	+			+		
白旋螺 <i>Cyraulus albus</i>	+						
圆顶珠蚌 <i>Unio douglasiae</i>	+	+		+			
圆头楔蚌 <i>Cuneopsis heudei</i>	+						
中国尖嵴蚌 <i>Acuticosta chinensis</i>	+						
背瘤丽蚌 <i>Lamprotula leai</i>							
洞穴丽蚌 <i>Lamprotula caveata</i>	+						
角月丽蚌 <i>Lamprotula cornuum-lunae</i>	+	+					
背角无齿蚌 <i>Anodonta woodiana woodiana</i>	+	+					
具角无齿蚌 <i>Anodonta angula</i>	+						
河无齿蚌 <i>Anodonta fluminea</i>	+						
河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>	+	+		+		+	
淡水壳菜 <i>Limnoperna fortunei</i>	+			+			+
内摇蚊 <i>Endochi ronomus</i>	+	+		+			
羽摇蚊 <i>Tendipes plumosus</i> sp.	+	+		+		+	
拟隐摇蚊属一种 <i>Demicrypiochironomus</i> sp.	+			+		+	
前突摇蚊属一种 <i>Procladius</i> sp.	+	+		+		+	+
长附摇蚊属一种 <i>Tanytarsus</i> sp.	+	+		+			
环足摇蚊属一种 <i>Cricotopus</i> sp.	+						
多足摇蚊属一种 <i>Polypedilum</i> sp.	+	+		+			+
粗腹摇蚊属一种 <i>Pelopia</i> sp.	+	+		+		+	+
菱跗摇蚊属一种 <i>Clinotanytus</i> sp.	+	+					
直突摇蚊属一种 <i>Orthocladus</i> sp.	+	+		+		+	+
长足摇蚊属一种 <i>Tanytus</i> sp.	+	+		+			
摇蚊属一种 <i>Corynoneura</i> sp.	+	+					
中华小长臂虾 <i>Palaemonetes sinensis</i>	+						
日本沼虾 <i>Macrobrachium nipponensis</i>		+		+			
锯齿新米虾 <i>Neocaridina denticulate denticulate</i>	+	+		+		+	
秀丽白虾 <i>Palaemon modestus</i>	+						
细足米虾 <i>Caridina nilotica gracilipes</i>	+						
华溪蟹属一种 <i>Sinopotamon</i> sp.	+						
花鳃蜉科一种 <i>Potamanthidae</i> sp.	+						
二尾蜉科一种 <i>Siphonuridae</i> sp.	+	+		+			+
似动蜉属一种 <i>Cinygmia</i> sp.	+	+					

物种	R1	R2	L1	L2	L3	L4
四节蜉属一种 <i>Baetis</i> sp.	+	+	+		+	
二翼蜉 <i>Cloeon dipterum</i>	+					
细蜉科一种 <i>Caenidae</i> sp.	+					
多距石蛾科一种 <i>Polycentropodidae</i> sp.	+	+				
纹石蛾科一种 <i>Hydropsychidae</i> sp.	+	+				
石蛾科的一种 <i>Caddisfly</i> sp.	+	+				
原石蛾科一种 <i>Rhyacophilidae</i> sp.	+	+				
长角石蛾科一种 <i>Leptoceridae</i> sp.	+	+				
亚洲瘦螳 <i>Ischnura asiatica</i>		+		+		
蜻科一种 <i>Libellulidae</i> sp.	+	+				
褐顶赤卒 <i>Sympetrum infuscotum</i>	+	+				
虎蜻 <i>Epitheca marginata</i>	+	+				
箭蜓 <i>Gomphus</i> sp.	+	+				
大蜻蜓 <i>Anotogaster sieboldii</i>	+	+				
蜓科一种 <i>Gomphidae</i> sp.	+	+		+		
丝螳科一种 <i>Lestidae</i> sp.	+	+				
螳科一种 <i>Coenagrionidae</i> sp.	+	+		+		
黑河螳 <i>Agrion atratum</i>	+	+				
蝎蜻蜓科一种 <i>Nepidae</i> sp.	+					
划蜻蜓科一种 <i>Corixidae</i> sp.	+	+				
划蜻蜓 <i>Corixa substriata</i>	+	+				

续表

仰泳蝽科一种Notonectidae sp.	+						
龙虱科一种Dytiscidae sp.	+	+					
沼梭科一种Haliplidae sp.	+	+					
水龟甲科一种Hydrophilidae sp.			+				
长角泥甲科一种Elmidae sp.	+		+				
稻根蛆 <i>Tipula praepotens</i>				+			
大蚊科一种Tipulidae sp.	+						
伊蚊 <i>Aedine mosquitoes</i>	+						
蚋科一种Simuliidae sp.	+						
蝇科一种Muscidae sp.	+						
石蝇科一种Perlidae sp.	+	+					
虻科一种Tabanidae sp.	+						
水虻科一种Stratiomyidae sp.	+						
食蚜蝇科一种Syrphidae sp.				+			
螺科一种Ceratopogonidae sp.	+						
毛螺科一种Psychodidae sp.	+						
负子蝽科一种Belostomatidae sp.	+						
沼牙虫 <i>Laccobtus</i>	+	+					
苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>	+	+	+	+	+	+	+
中华颤蚓 <i>Tubifex sinicus</i>	+	+	+	+	+	+	+
霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	+	+	-	+	+	+	+
扁蛭属一种 <i>Glossiphonia</i> sp.	+	+	-				
泽蛭属一种 <i>Helobdella</i> sp.	+	-					
医蛭属一种 <i>Hirudo</i> sp.	+	-					
石蛭属一种 <i>Herpobdella</i> sp.	+	+					
宽体金线蛭 <i>Whitmania pigra</i>	+						
日本医蛭 <i>Hirudo nipponia</i>	+	+					
拟扁蛭属一种 <i>Hemiclepsis</i> sp.	+						
合计	105	68	34	11	11	7	

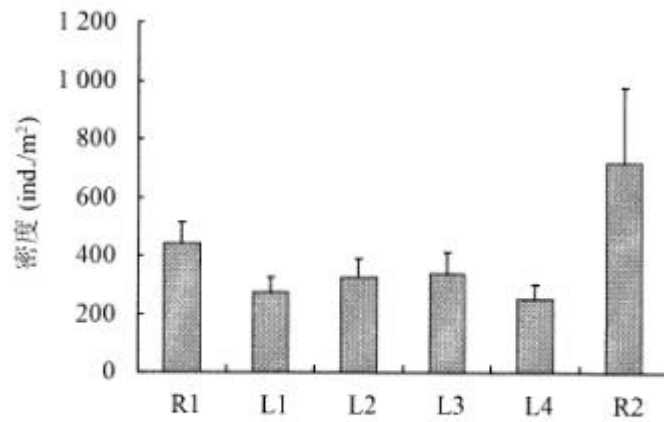


图2 仙女湖不同区域大型底栖动物栖息密度年均变化

Fig.2 Dynamics of the Macrozoobenthos's Density in Different Areas in the Lake Xiannv Basin

2.2.2 生物量

仙女湖年平均生物量为 54.26 g/ m²。河流型生境(R1, R2)年平均生物量较大,为 102.41 g/ m²。湖泊型生境(L1, L2, L3和L4)年平均生物量最小,为 10.11 g/ m² (图 4)。6月平均生物量最高 154.78 g/ m²,可能由于该月份水生植物茂盛,为螺类提供了充足的摄食来源,加速了螺类的生长于繁殖有关。4月平均生物量最低,为 1.67 g/ m² (图 5)。

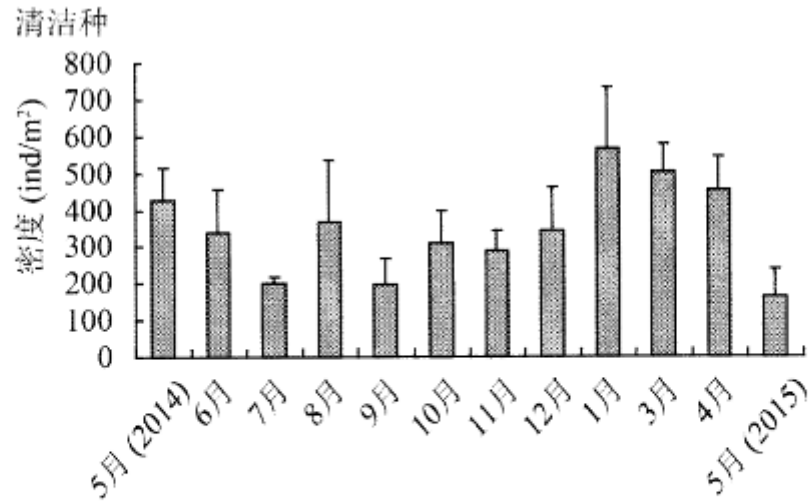


图 3 2014年5月~2015年5月仙女湖大型底栖动物栖息密度周年逐月动态图
 Fig.3 Monthly Dynamics of the Macrozoobenthos's Density in Xiannv Lake Basin During the Period from May in 2014 to May in 2015

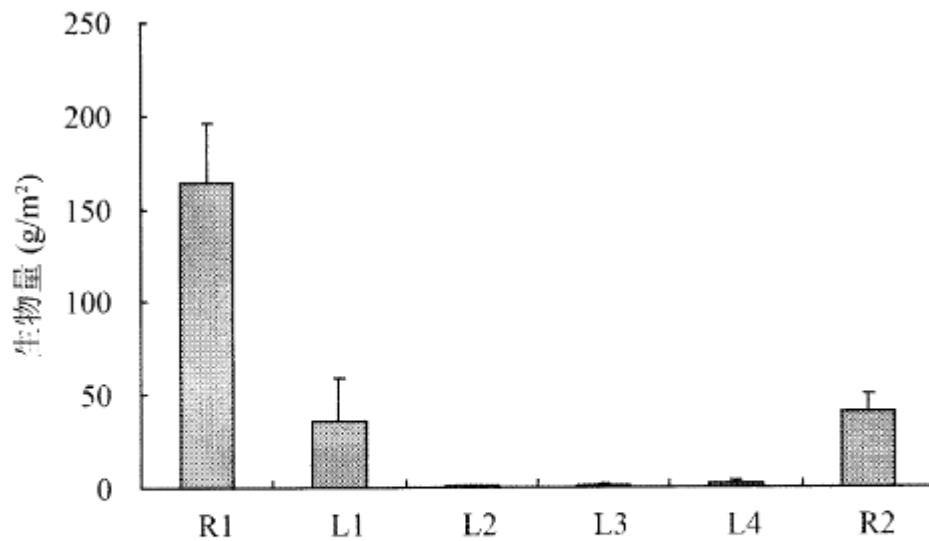


图 4 仙女湖不同区域大型底栖动物生物量变化
 Fig.4 Spatial Dynamics of the Macrozoobenthos's Biomass in Xiannv Lake Basin

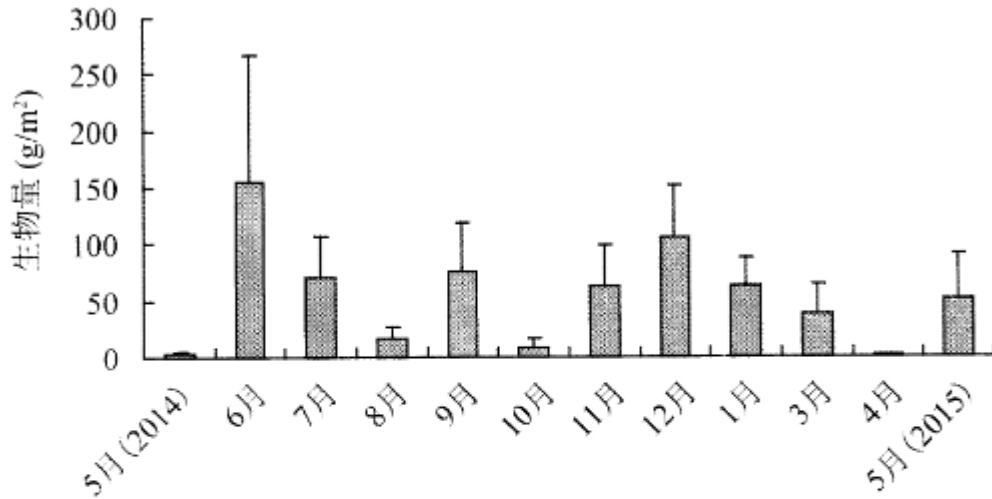


图5 2014年5月~2015年5月仙女湖大型底栖动物生物量变化
 Fig.5 Monthly Dynamics of the Macrozoobenthos's Biomass in Xianny Lake Basin During the Period from May in 2014 to May in 2015

2.2.3 优势种季节变化

优势种为中华颤蚓、梨形环棱螺、河蚬、锯齿新米虾、羽摇蚊、粗腹摇蚊、前突摇蚊和霍甫水丝蚓。寡毛类的中华颤蚓和霍甫水丝蚓在所有区域都出现。其中，中华颤蚓栖息密度春季最大，为220.87 ind./m²。软体动物的梨形环棱螺栖息密度冬季最大，达115.56 ind./m²。摇蚊类的前突摇蚊、粗腹摇蚊分布较为普遍，羽摇蚊冬季栖息密度最大，为399.43 ind./m²。甲壳类锯齿新米虾秋季栖息密度最大，为148.38 ind./m²。

2.3 大型底栖动物功能摄食群

从栖息密度看(图8)，撕食者在L1区域所占比例最大，占52.78%，R1区域所占比例最小，占8.68%。刮食者在R1区域所占比例最大，占53.27%。而在L3区域所占比例最小，占0.00%。捕食者在L4区域所占比例最大，达19.57%，L3区域所占比例最小，占0.00%。收集者L2区域所占比例最大64.59%，R2区域所占比例最小，占10.56%。

从生物量看，撕食者在R1区域所占比例最小，占0.03%。L3区域所占比例最大，占18.44%。刮食者L1区域所占比例最大99.40%，L3区域所占比例最小，占0.00%。捕食者L4区域所占比例最大，占15.07%，L3区域所占比例最小，占0.00%。收集者L3区域所占比例最大82.00%，L1区域所占比例最小0.30%。

2.4 群落的划分与MDS分析

用R软件对6个区域的群落聚类与MDS结果基本相同(图)。仙女湖6个区域大致可分为2个类群。L1, L2, L3, L4位类群1。河蚬，梨形环棱螺，锯齿新米虾为特征种。类群2包括R1, R2区域，霍甫水丝蚓，前突摇蚊，中华颤蚓，粗腹摇蚊为特征种。

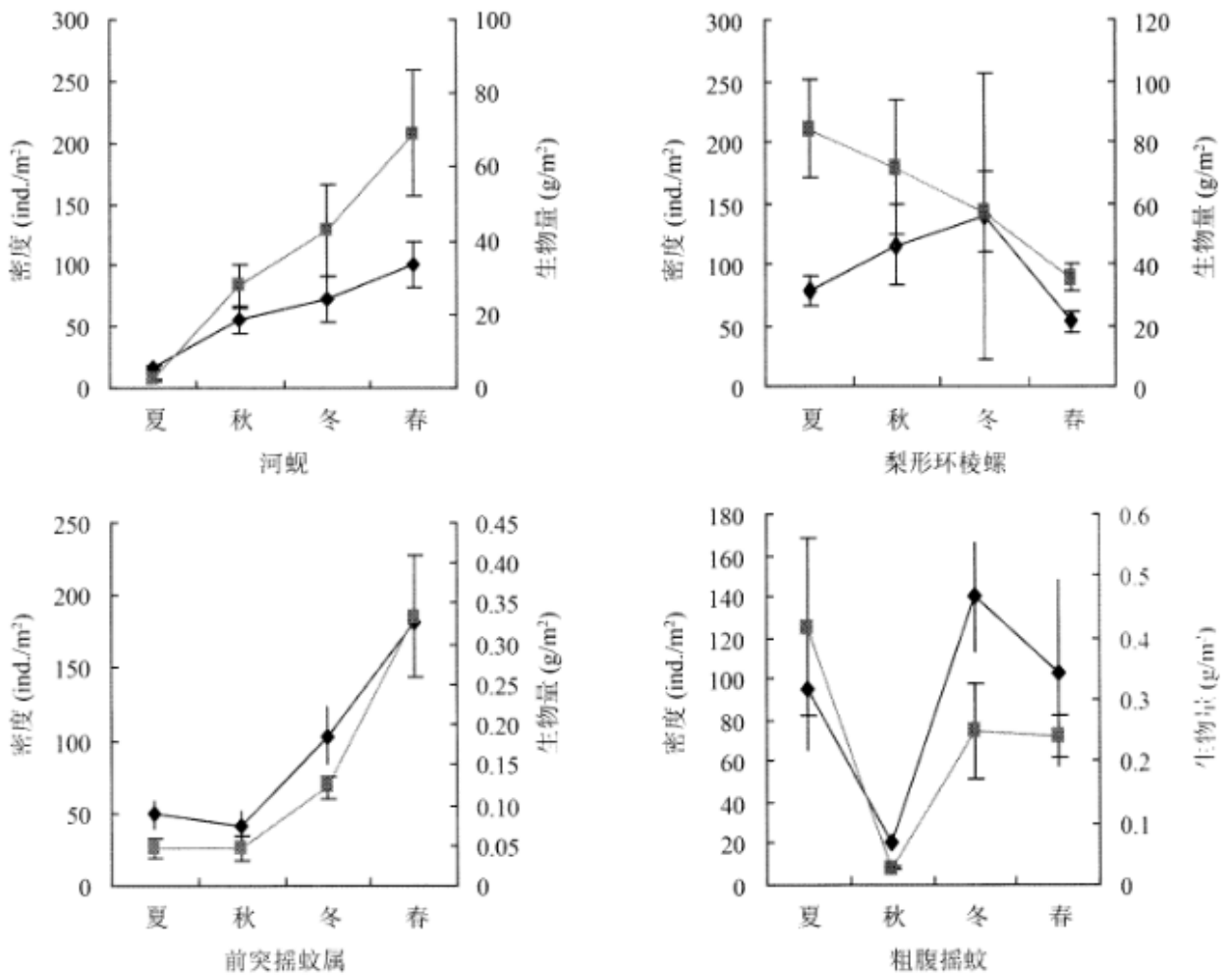
2.5 大型底栖动物群落多样性指数变化特征与水质评价

根据调查结果计算了仙女湖各分区内大型底栖动物群落的辛普森指数，各区域差异极显著($P < 0.01$)。从表 3 看出，辛普森指数 $R1 > R2 > L1 > L4 > L3 > L2$ ，总体看入湖河流轻度污染，湖区中度污染。

3 讨论

3.1 仙女湖水库湖区与入湖河流的比较

本次研究表明，仙女湖大型底栖动物群落在空间上具有显著差异。聚类分析将 6 个区域分成湖泊生境与河流生境 2 组。从物种数和现存量看，仙女湖入湖河流中的大型底栖动物群落比湖区更为丰富，入湖河流共记录大型底栖动物共 105 种，年平均生物量 102.41 g/m^2 ，年平均栖息密度 582 ind./m^2 ；湖区共记录底栖动物 34 种，年平均生物量 10.16 g/m^2 ，年平均栖息密度 298 ind./m^2 。从历史看，仙女湖湖区是 1958 年通过拦截袁河蓄水而成，平均水深 9.23 m，而其入湖河流平均水深 0.86 m。研究表明，水深是影响水湖库底质环境的至关重要因素之一，能够明显的改变和影响底栖动物群落的物种组成，生物量和栖息密度^[13, 14]。随着水深的增加，大型底栖动物的物种数，栖息密度和生物量都存在着递减的现象^[15-17]，湖区深水区大型底栖动物组成单调，寡毛类为优势类群，水生昆虫与软体动物等栖息密度极低，或不会出现^[18]。仙女湖入湖河流与湖区底栖动物群落特征也表现出上述现象。



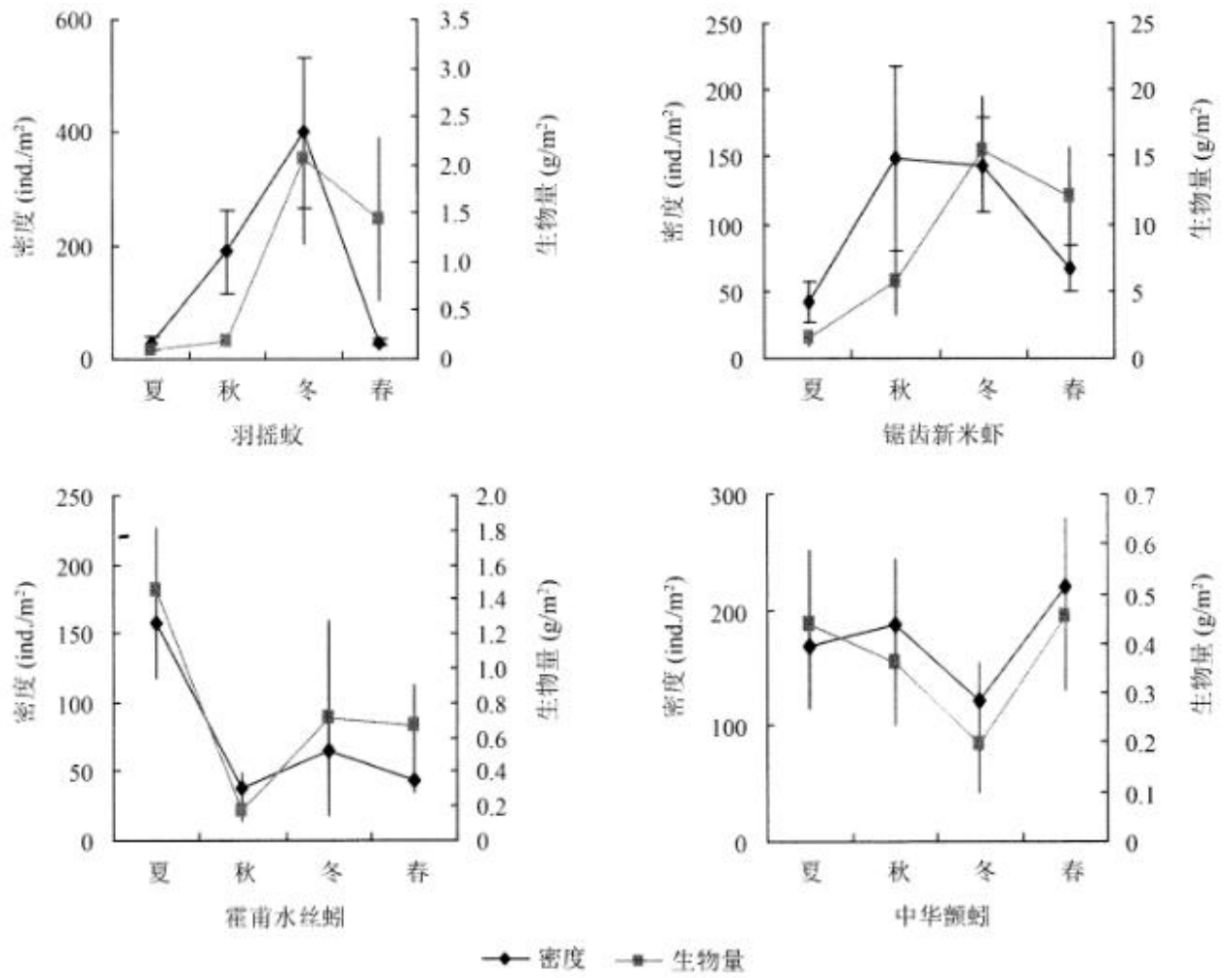


图6 仙女湖流域优势种不同季节栖息密度与生物量变化

Fig.6 Seasonal Dynamics of Dominant Species' Density and Biomass in Xianny Lake Basin

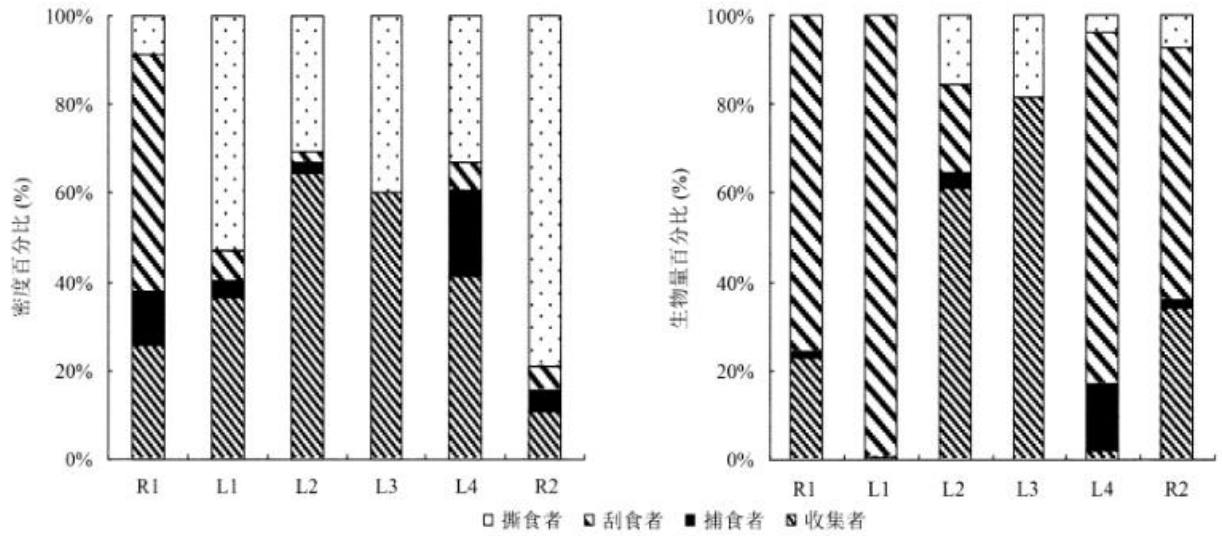


图 7 流域不同区域底栖动物功能群栖息密度与生物量百分比

Fig.7 Density and Biomass of Macrozoobenthos in Different Zones of Xiannv Lake Basin

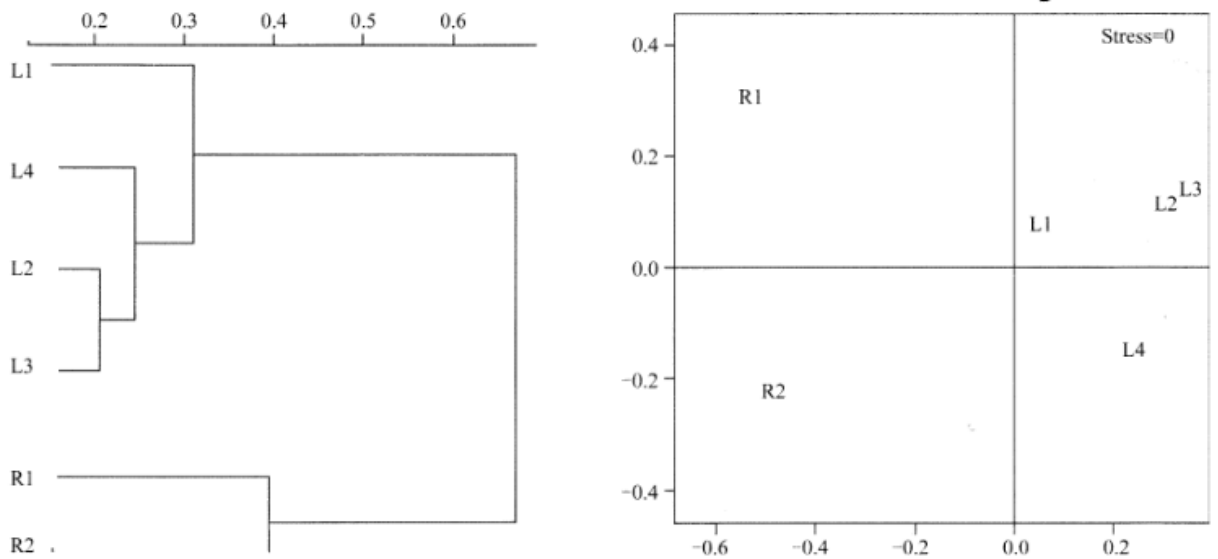


图 8 仙女湖底栖动物栖息密度与生物量聚类与MDS分析图

Fig.8 Dendrogram and MDS Ordination Plot of Density and Biomass of Macrozoobenthos

表 3 仙女湖各分区内大型底栖动物群落辛普森指数

Tab.3 Simpson's Diversity Index of Macrozoobenthos in Different Area of Xiannv Lake Basin

区域	L1	L2	L3	L4	R1	R2
辛普森指数	0.811 1	0.584 1	0.612 6	0.681 6	0.918 8	0.852 9
水质评价	轻污	中污	中污	中污	轻污	轻污

水生植物也是影响湖库和河流底质环境质量的重要因素。入湖河流水生植物群落比湖区茂盛，为大型底栖动物提供了繁殖、摄食、栖息和躲避捕食的场所，尤其是为刮食者提供了充足的食物来源^[19]，对维持大型底栖动物群落多样性起着重要的作用，这与陈立婧等^[20]在南漪湖的研究结果一致，也与闫云君等^[21]在扁担塘和后湖的研究结果相一致。目前湖区水生植物稀少，一方面主要由于拦截袁河以后，湖区水位升高、水生植物种子库缺失和群落难以在深水快速建成的原因，另一方面，也可能是几十年来湖泊放养草食性鱼类导致的结果，这使得湖区底栖动物的物种丰度不高，而霍甫水丝蚓等耐污物种占优势。湖区大型底栖生物辛普森指数较低，说明湖区底质环境质量较差，大型底栖动物多样性较低。

生物多样性是湖泊生态系统健康程度的重要标志，仙女湖作为国家开展湖泊生态环境保护试点湖泊，维持其生物多样性有着重要意义。底栖动物是水生生物的重要类群，鉴于目前湖区生物多样性状况，应当控制湖区渔业规模和控制湖泊生态功能维持区的污染物输入，并开展浅水区水生植物群落人工构建和干扰区生态恢复，为底栖动物的生存繁殖提供有利环境，实现仙女湖底栖动物群落重构。

表 4 仙女湖水库与其他水库的比较
Tab.4 Macrozoobenthos's Community Structure of Different Reservoirs Throughout the Country

湖库	湖泊营养水平	种类数(种)	栖息密度(ind./m ²)	生物量(g/m ²)	优势种	采样时间(年)	平均水深(m)
五湖水库 ^[22]	-	46	883	1.64	-	1987~1988	-
浮桥河水库 ^[23]	富营养	47	529.10	3.53	霍甫水丝蚓、中国长足摇蚊、前突摇蚊属、摇蚊属	1997~1998	-
道观河水库 ^[24]	富营养	17	142.00	0.99	大红德永摇蚊、霍甫水丝蚓	1999	10.3
南漪湖 ^[20]	中-富营养	39	116.05	185.60	河蚬、梨形环棱螺铜锈环棱螺、长角涵螺	2004	3
军山湖 ^[25]	中营养	37	197.72	164.29	-	2005~2006	4.5
富春江水库 ^[26]	中营养	20	375.10	45.69	水丝蚓属	2006	23
三道河水库 ^[27]	中营养	17	366.42	0.56	前突摇蚊、霍甫水丝蚓	2007~2008	20
分水江水库 ^[28]	-	37	488.00	1.86	霍甫水丝蚓	2008~2009	7
菜子湖 ^[29]	富营养	39	55.20	19.56	摇蚊、苏氏尾鳃蚓、长角涵螺	2008~2009	1.67
淀山湖 ^[30]	中营养	32	85.60	103.71	铜锈环棱螺、梨形环棱螺、河蚬、湖沼股蛤、螺蛳、霍甫水丝蚓、正颤蚓、中国长足摇蚊、寡鳃齿吻沙蚕、中国淡水蛭	2008~2010	小于2.63
洪泽湖 ^[31]	中-富营养	14	45.45	52.43	河蚬、苏氏尾鳃蚓、羽摇蚊、霍甫水丝蚓、铜锈环棱螺	2010~2011	2
鄱阳湖国家级自然保护区 ^[32]	中-富营养	79	182.82	71.13	梨形环棱螺、赤豆螺中华沼螺、前突摇蚊	2011	-
柘林水库 ^[33]	贫-中营养	32	620.42	16.05	中华颤蚓	2012~2013	45
仙女湖	中营养	116	346.29	54.26	中华颤蚓、梨形环棱螺、河蚬、锯齿新米虾、羽摇蚊、粗腹摇蚊属、前突摇蚊属、霍甫水丝蚓	2014~2015	12

3.2 仙女湖与其他水体的比较

与长江中下游其他淡水水体比较(表 4)，仙女湖作为山地丘陵型深水水库，大型底栖动物物种数和优势种种类相对较多，年平均生物量也相对较高。底栖动物物种丰富可能由于仙女湖水库入湖河流较多，湖区森林覆盖度极高，流域内海拔波动较大(海拔变幅约在300~1 000 m之间)，流域生境异质性高，为底栖动物摄食、避难、抚育提供了更多样且可选择的生境，其中不乏有许多溪流型种类。表 4也可以看出，水深较深的水库中适应或耐受低氧环境的水蚯蚓和摇蚊幼虫多占优势，如江西柘林水库，平均水深45m，中华颤蚓为优势种。水深较浅的水库中软体动物则多占优势，如安徽南漪湖平均水深3m，优势种为河蚬、梨形环

棱螺、铜锈环棱螺和长角涵螺。

从湖泊营养水平看，富营养水体中，摇蚊类和寡毛类为优势种，可能由于富营养水体含氧量较低，而多数摇蚊类和寡毛类能够忍受缺氧环境，所以在富营养水质生境中占优势。中富营养水体中，摇蚊类，寡毛类、腹足类和双壳类占优势。仙女湖为中营养型湖泊(均深12 m)，摇蚊类、寡毛类、腹足类、双壳类和甲壳类占优势。富春江水库，三道河水库为中营养型水体，但可能由于平均水深较大(20 m)，水底含氧量较低，所以耐低氧的摇蚊类与寡毛类占优势。

致谢：江西省环境保护科学研究所的周曼琳和周东华化学分析师，联合培养研究生邹斌春、匡武名和陆友伟同学，该院职工周慤、万稟灏、吴俊伟和朱佳琪等，对本研究提供的支持与帮助。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] THORNER, WILLIAM SP. The response of benthic macroinvertebrates to pollution in developing countries: a multimetric system of bioassessment[J]. *Freshwater Biology*, 1997, 37(3): 671 - 686.
- [3] 廖卫兵, 熊明辉, 黎小军. 仙女湖水体中氮素变化特征分析[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(17): 7405 - 7406, 7444.
- [4] 王伟萍, 贺刚, 王信勇, 等. 仙女湖水质理化性质研究[J]. *江西水产科技*, 2010(4): 18 - 20.
- [5] 邹斌春. 仙女湖富营养化演变、驱动机制及水华风险评估[D]. 南昌:南昌大学硕士学位论文, 2015.
- [6] 大连水产学院. 淡水生物学[M]. 北京: 农业出版社, 1982.
- [7] 刘月英, 张文珍, 王耀先. 医学贝类学[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- [8] 段雪花, 王兆印, 徐梦珍. 底栖动物与河流生态评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [9] 徐兆礼, 王云龙, 陈亚瞿, 等. 长江口最大浑浊带区浮游动物的生态研究[J]. *中国水产科学*, 1995, 2(1): 39 - 48.
- [10] 蔡晓明, 任久长, 宗志祥, 等. 青龙河底栖无脊椎动物群落结构及其水质评价[J]. *应用生态学报*, 1992, 3(4): 364 - 370.
- [11] 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.
- [12] NOLBY L E, ZIMMER K D, HANSON M A, et al. Is the island biogeography model a poor predictor of biodiversity patterns in shallow lakes?[J]. *Freshwater Biology*, 2015, 60(5): 870 - 880.
- [13] OHTAKA A, NISHINO M, KOBAYASHI T. Disappearance of deep profundal zoobenthos in lake Ikeda, southern Kyushu, Japan, with relation to recent environmental changes in the lake[J]. *Limnology*, 2006, 7(3): 237 - 242.

-
- [14] BAUDO R, OCCHIPINTI A, NOCENTINI AM, et al. Benthos of lake Orta in the year 1996[J]. *Journal of Limnology*, 2001, 60(2): 241 - 248.
- [15] 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.
- [16] 崔奕波, 李钟杰. 长江流域湖泊的渔业资源与环境保护[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 85 - 86.
- [17] 马徐发, 熊邦喜, 王明学, 等. 湖北道观河水库大型底栖动物的群落结构及物种多样性[J]. *湖泊科学*, 2004, 16(1): 49 - 55.
- [18] 梁彦龄, 王洪铸. 底栖动物[M]//刘建康. 高级水生生物学. 北京: 科学出版社, 1999: 241 - 259.
- [19] ENGEL S. The role and interaction of submerged macrophytes in a shallow Wisconsin lake[J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 1998, 4:329 - 341.
- [20] 陈立婧, 彭自然, 孙家平, 等. 安徽南漪湖大型底栖动物群落结构[J]. *动物学杂志*, 2008, 43(1): 63 - 68.
- [21] 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.
- [22] 向启华. 江西五湖水库的底栖动物[J]. *四川动物*, 1990, 9(2): 8 - 10.
- [23] 彭建华, 刘家寿, 熊邦喜, 等. 湖北浮桥河水库底栖动物的群落结构及生物多样性[J]. *湖泊科学*, 2002, 14(1): 90 - 96.
- [24] 马徐发, 熊邦喜, 王明学, 等. 湖北道观河水库大型底栖动物的群落结构及物种多样性[J]. *湖泊科学*, 2004, 16(1): 49 - 55.
- [25] 潘洪超. 军山湖底栖动物群落结构及其生产量的研究[D]. 南昌: 南昌大学硕士学位论文, 2007.
- [26] 韩轶才, 盛海燕, 吴洁, 等. 富春江水库大型底栖动物群落的初步研究[J]. *环境污染与防治*, 2011, 33(12): 23 - 26, 32.
- [27] 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.
- [28] 刘其根, 查玉婷, 陈立侨, 等. 浙江分水江水库大型底栖动物群落结构及水质评价[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(5): 1377 - 1384.
- [29] 徐小雨, 周立志, 朱文中, 等. 安徽菜子湖大型底栖动物的群落结构特征[J]. *生态学报*, 2011, 31(4): 943 - 953.
- [30] 徐霖林. 淀山湖大型底栖动物群落结构特征及其与水体理化因子关系的研究[D]. 上海: 华东师范大学硕士学位论文, 2011.

[31] 张超文, 张堂林, 朱挺兵, 等. 洪泽湖大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 水生态学杂志, 2012, 33(3): 27 - 33.

[32] 肖晋志. 鄱阳湖国家级自然保护区及周边河流大型底栖动物群落结构及多样性研究[D]. 南昌: 南昌大学硕士学位论文, 2012.

[33] 曾 旻, 廖 兵, 安长廷, 等. 江西柘林水库大型底栖动物群落结构[J]. 南昌大学学报(理科版), 2014, 38(5): 506 - 510.