

# 高原深水湖泊抚仙湖大型底栖动物群落结构及多样性

熊飞<sup>1,2</sup> 李文朝<sup>2\*</sup> 潘继征<sup>2</sup>

1 (江汉大学, 武汉 430056)

2 (中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

**摘要:** 云南抚仙湖是我国典型的高原深水湖泊, 20世纪80年代以来, 随着人类活动的加剧, 其水体营养水平不断提高, 生态系统发生了显著变化。为揭示该湖底栖动物的群落特征及其对生态系统变化的响应, 2005年6–7月对大型底栖动物群落进行了调查。在抚仙湖18个断面110个样点中共采集大型底栖动物19属27种, 大型底栖动物出现率为97.3%, 平均密度为855 ind./m<sup>2</sup>, 平均生物量为58.01 g/m<sup>2</sup>。在密度组成上软体动物(50.3%)>摇蚊幼虫(32.3%)>寡毛类(17.4%), 优势种为花纹前突摇蚊(*Procladius choreus*)、长角涵螺(*Alocinma longicornis*)和方形环棱螺(*Bellamya quadrata*), 三者共占总密度的51.4%。寡毛类和摇蚊幼虫全湖性分布, 而软体动物主要分布在沿岸区, 各类群优势种均呈聚集分布。底栖动物在沿岸区生物量显著大于湖心区( $P < 0.01$ ), 但两者之间密度差异不显著( $P > 0.05$ ); 南区和北区之间的密度( $P > 0.05$ )和生物量( $P > 0.05$ )差异均不显著。相关分析表明, 表层沉积物总有机碳、底层水体溶解氧是影响底栖动物密度分布的关键理化因子, 而底层水体溶解氧是影响底栖动物生物量分布的关键理化因子。抚仙湖大型底栖动物群落的Pielou均匀度指数、Margalef丰富度指数、Simpson优势度指数、Shannon-Wiener多样性指数及改进的Shannon-Wiener多样性指数分别为0.74、2.88、0.87、2.40和20.84。沿岸区底栖动物多样性明显高于湖心区, 主要是由于沿岸区分布有各种沉水植物, 提高了底栖动物生境的异质性。与1980年调查结果相比, 抚仙湖底栖动物多样性呈上升趋势, 这与水体营养水平不断提高, 沉水植物分布面积扩大有关。  
**关键词:** 软体动物, 寡毛类, 摇蚊幼虫, 群落, 抚仙湖

## Community structure and diversity of macrozoobenthos in Fuxian Lake, a deep plateau lake in Yunnan

Fei Xiong<sup>1,2</sup>, Wenchao Li<sup>2\*</sup>, Jizheng Pan<sup>2</sup>

1 Jiangnan University, Wuhan 430056

2 Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008

**Abstract:** Fuxian Lake is a representative deep plateau lake located in Yunnan Province, China. As human activities have increased since the 1980s, nutrients in the lake have been gradually rising, thereby changing the lake ecosystem. To describe the lake's macrozoobenthic community and its response to ecological changes, we surveyed the macrozoobenthic community in Fuxian Lake from June to July in 2005. Twenty seven macrozoobenthic species belonging to 19 genera were collected in 110 sampling sites of 18 sections, and the community's frequency of occurrence, average density, and average biomass were 97.3%, 855 ind./m<sup>2</sup>, and 58.01 g/m<sup>2</sup>, respectively. Mollusca was the dominant taxa in the lake (up to 50.3% of total density), followed by Chironomidae (32.3%), and Oligochaeta (17.4%). *Procladius choreus*, *Alocinma longicornis* and *Bellamya quadrata* were dominant species, accounting for 51.4% of total density. Oligochaeta and Chironomidae were distributed throughout the lake, while Mollusca were mainly found in the near-shore region. All dominant species showed an aggregated distributional pattern. Average macrobenthic biomass was significantly higher in the near-shore region than in the open-water region ( $P < 0.01$ ), but average density did

收稿日期: 2007-10-08; 接受日期: 2008-03-12

基金项目: 中国科学院南京地理与湖泊研究所知识创新工程前沿项目(CXNIGLAS-A01)

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: wchli@niglas.ac.cn

not differ between the two regions ( $P > 0.05$ ). There were no differences in average density ( $P > 0.05$ ) or biomass ( $P > 0.05$ ) between the southern and northern portion of the lake. Correlation analyses indicated that total organic carbon in the sediment and dissolved oxygen were the key physical-chemical factors influencing macrozoobenthic density, while dissolved oxygen was the key factor influencing macrozoobenthic biomass. Macrozoobenthic diversity measured using Pielou, Margalef, Simpson, Shannon-Wiener, and modified Shannon-Wiener indices were 0.74, 2.88, 0.87, 2.40, and 20.84, respectively. Macrozoobenthic diversity was higher in the near-shore than in the open-water region, likely resulting from various submerged macrophytes in the near-shore region, which increased habitat heterogeneity. Compared to a 1980 survey, macrozoobenthic diversity in Fuxian Lake was higher in 2005, likely a result of increased nutrient levels and enlarged distribution of submerged macrophytes.

**Key words:** Mollusca, Oligochaeta, Chironomidae, community, Fuxian Lake

底栖动物不仅是鱼类重要的饵料,而且在物质循环和能量流动等方面也发挥着重要作用(Hutchinson, 1993)。底栖动物可被用来估算渔产潜力(梁彦龄等, 1995),用作环境指示生物(Goran, 1994; 王备新和杨莲芳, 2001; 蔡立哲, 2003; 姜莘红等, 2006),底栖动物完整性指数(B-IBI)可用来评价水生生态系统的健康状况(马克明等, 2001; Klemm *et al.*, 2002; 王备新等, 2005)。湖泊的大型底栖动物主要包括水栖寡毛类(Oligochaeta)、软体动物(Mollusca)和水生昆虫(Insecta)等三类。目前对大型底栖动物的研究很多,内容主要涉及到群落结构、生物多样性、生产力、能量流动和生态模型等(Lindegaard, 1992; 龚志军等, 2001; Yan & Liang, 2002; Lars & Viktor, 2003; 熊金林等, 2003; 闫云君和梁彦龄, 2004; 邬红娟等, 2005; Vander Zanden *et al.*, 2006)。国内的研究主要集中在浅水湖泊,深水湖泊由于地理位置偏远和采样困难等因素,大型底栖动物研究常被忽视。在深水湖泊,大型底栖动物受外界扰动相对较小,其群落分布特征和长期演变能很好地指示湖泊环境的变化情况。

抚仙湖是我国著名的高原深水断陷型湖泊,20世纪80年代中国科学院南京地理与湖泊研究所(1990)曾对其大型底栖动物进行过调查,但并没有详细研究其群落结构、各类群分布特征及生物多样性等。至今相关研究仍较少(Cui & Wang, 2005; 熊飞等, 2007)。近20年来,随着入湖污染的加剧,抚仙湖营养水平不断提高(李荫玺等, 2007),加上其换水周期长达37年,污染物在湖内的滞留率很高,这将对底栖动物生存环境产生很大影响。本文研究了抚仙湖大型底栖动物群落结构、分布规律及其多样性,以期研究高原深水湖泊生态系统长期演变规律

积累资料。

## 1 研究地区概况

抚仙湖位于云南省中部玉溪市境内,距昆明市东南约60 km。呈南北向倒葫芦型,北部宽而深,南部窄而浅。湖泊面积211 km<sup>2</sup>,最大水深155 m,平均水深89.6 m,全湖大于100 m水深的水面占45.5%,小于10 m的仅占4.1%。抚仙湖属珠江流域南盘江水系,湖水主要靠降雨和四周山间小溪汇集补给,入湖河流主要有尖山河、路歧河、东大河和西大河等30多条。湖东岸的海口河为唯一的出水口,西南岸通过一条宽8 m,长约2 km的隔河与上游的星云湖相连。雨量充沛,年均气温15.6℃,5-10月为雨季,11月至翌年4月为旱季。全年底层湖水温度基本恒定在13℃左右,表层水温随季节变化幅度约10℃,夏季表层水温可升高到23.1℃(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 1990)。水体电导率平均为28.7 ms/cm, pH值平均为8.73(Zhang *et al.*, 2005)。

## 2 研究方法

### 2.1 样点布设

2005年6-7月,依托课题组设计的水上工作平台,对抚仙湖底栖动物进行了采样分析。全湖共设18个断面(图1),累计采样点110个。断面P1-P9位于北区, P10-P18位于南区。岸距<1,000 m的样点归于沿岸区,岸距≥1,000 m的样点归于湖心区。

### 2.2 样品采集

抚仙湖的大型底栖动物除寡毛类、摇蚊幼虫和软体动物外,还有虾、蟹、蛭等,本研究的对象主要指前三类。

用面积为1/16 m<sup>2</sup>的彼得生采泥器采集底泥,每

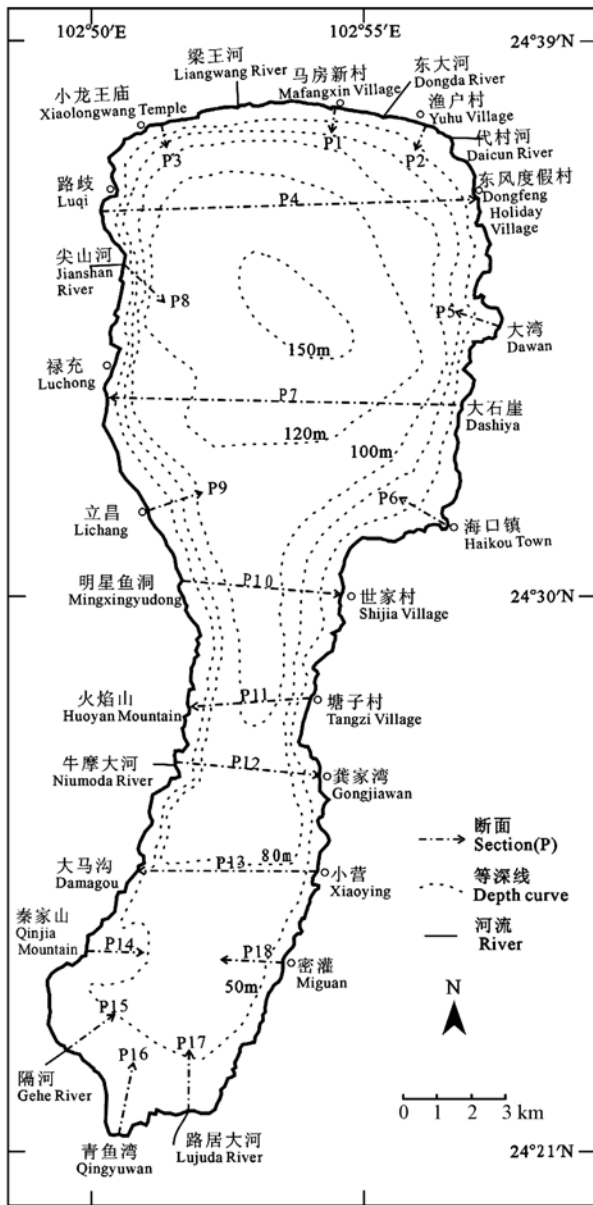


图1 抚仙湖大型底栖动物调查采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites for surveys of macrozoobenthos in Fuxian Lake

个点视情况采集1-2次。经孔径0.15 mm筛网洗净后在解剖盘中逐一将底栖动物拣出,粗挑后的泥样装入封口塑料袋带回实验室进一步详细挑拣。由于软体动物某些种类附着在沉水植物上,其采集结合使用彼得生采泥器和气动大型底栖生物采样器两种工具。底栖动物的固定和保存参考黄祥飞(1999)。借助解剖镜和显微镜对标本进行鉴定(刘月英等, 1979; Wang & Wang, 1994; 王洪铸, 2002)和计数。软体动物称取鲜重,其他底栖动物重量系在标本保

存约2个月后称得,先用滤纸吸去表面固定液,然后置于电子天平上称量。

每个样点用测绳测量水深,部分深水区水深数据由RBR深水水质剖面仪获取。采表层水样分析总氮、总磷和叶绿素a含量,采表层沉积物分析总有机碳、全氮和全磷含量。具体分析测定方法参考黄祥飞(1999)。底层水体溶解氧由RBR深水水质剖面仪获取。

### 2.3 数据分析

出现率的计算公式为:

出现率=物种(类群)出现的样点数/样点总数  
×100% (1)

用 $I_b$ 指数分析底栖动物的空间分布型(王银东等, 2005):

$$I_b = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i(X_i - 1)}{N(N - 1)} \quad (2)$$

式中 $n$ 为样本数, $N$ 为总个体数, $X_i$ 为第 $i$ 个样本中的个体数, $I_b$ 小于1为均匀分布,等于1为随机分布,大于1为聚集分布。用 $F_0$ 进行聚集度的显著性检验, $F_0$ 大于 $F_{0.05}(n-1, \infty)$ 为显著。计算公式如下:

$$F_0 = \frac{I_b(N-1) + n - N}{(n-1)} \quad (3)$$

采用Pielou均匀度指数( $J$ )(Pielou, 1975)、Margalef丰富度指数( $d_M$ )(Margalef, 1957)、Simpson优势度指数( $D$ )(Simpson, 1949)、Shannon-Wiener多样性指数( $H'$ )(Shannon & Wiener, 1949)及改进的Shannon-Wiener指数( $\beta$ )(王寿兵, 2003)等对底栖动物群落结构和组成特点进行分析。计算公式如下:

$$J = H' / \ln S \quad (4)$$

$$d_M = (S - 1) / \ln N \quad (5)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^s (n_i / N)^2 \quad (6)$$

$$H' = - \sum_{i=1}^s (n_i / N) \ln(n_i / N) \quad (7)$$

$$\beta = - \ln(N) \sum_{i=1}^s (n_i / N) \ln(n_i / N) \quad (8)$$

其中 $S$ 为群落中物种的数目, $N$ 为样方中观察到的个体总数, $n_i$ 为第 $i$ 物种的个体数。

数据的分析处理使用Excel和SPSS软件。不同湖区之间生物量(密度)比较使用 $t$ 检验,底栖动物密度、生物量与环境理化因子的相关分析使用SPSS

的双变量相关分析和偏相关分析。

### 3 结果

#### 3.1 种类组成

2005年6-7月在抚仙湖采集大型底栖动物19属27种(表1), 其中寡毛类6属12种, 软体动物8属9种, 摇蚊幼虫5属6种。110个样点中共采集寡毛类标本1,032只, 摇蚊幼虫标本1,894只, 软体动物标本2,953只。

#### 3.2 出现率

大型底栖动物在全湖的出现率为97.3%, 出现率为寡毛类>摇蚊幼虫>软体动物; 各类群在南区的出现率均大于北区, 摇蚊幼虫和寡毛类在沿岸区的出现率明显小于湖心区, 而软体动物在沿岸区的出现率明显大于湖心区(表2)。

#### 3.3 密度和生物量

抚仙湖大型底栖动物平均密度为855 ind./m<sup>2</sup>, 其中软体动物占50.3%, 摇蚊幼虫占32.3%, 寡毛类

表1 抚仙湖大型底栖动物名录及其分布

Table 1 List of macrozoobenthos in Fuxian Lake and their distribution in the different regions

物种 Species	南区 Southern portion	北区 Northern portion	沿岸区 Near-shore region	湖心区 Open-water region
寡毛类 Oligochaeta				
苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>	+	+	+	+
霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	++	+	++	+
巨毛水丝蚓 <i>L. grandisetosus</i>	+	+	+	+
水丝蚓属一种 <i>Limnodrilus</i> sp.	-	+	+	+
<i>Potamothrix</i> 属一种 <i>Potamothrix</i> sp.1	+	+	+	+
<i>Potamothrix</i> 属一种 <i>Potamothrix</i> sp.2	++	+	+	+++
正颤蚓 <i>Tubifex tubifex</i>	+	+	+	+
皮氏管水蚓 <i>Aulodrilus pigueti</i>	-	+	+	+
日本管水蚓 <i>A. japonicus</i>	-	+	+	-
多毛管水蚓 <i>A. plurisetia</i>	-	+	+	+
湖沼管水蚓 <i>A. limnobius</i>	-	+	+	-
癩颤蚓属一种 <i>Spirosperma</i> sp.	-	+	+	-
摇蚊幼虫 Chironomidae				
花纹前突摇蚊 <i>Procladius choreus</i>	+++	+++	+++	+++
羽摇蚊 <i>Chironomus plumosus</i>	++	+	++	-
隐摇蚊属一种 <i>Cryptochironomus</i> sp.	+	+	+	+
指突隐摇蚊 <i>C. digitatus</i>	+	+	+	-
多足摇蚊属一种 <i>Polypedilum</i> sp.	+	+	+	+
小突摇蚊属一种 <i>Micropsectra</i> sp.	+	+	+	+
软体动物 Mollusca				
河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>	+	+	+	+
方形环棱螺 <i>Bellamyia quadrata</i>	++	+++	+++	-
梨形环棱螺 <i>B. purificata</i>	+	+	+	-
椭圆萝卜螺 <i>Radix swinhoei</i>	+	+	+	+
方格短沟蜷 <i>Semisulcospira cancellata</i>	++	+	++	+
长角涵螺 <i>Alocinma longicornis</i>	+	+++	+++	-
拟沼螺属一种 <i>Assimineia</i> sp.	+++	+	+++	-
凸旋螺 <i>Gyraulus convexiusculus</i>	+	+	+	-
中华圆田螺 <i>Cipangopaludina cathayensis</i>	+	+	+	-

+++ 平均密度 ≥ 100 ind./m<sup>2</sup>; ++ 50 ind./m<sup>2</sup> ≤ 平均密度 < 100 ind./m<sup>2</sup>; + 平均密度 < 50 ind./m<sup>2</sup>; - 未采到

+++ the average density is greater than or equal to 100 ind./m<sup>2</sup>; ++ the average density is greater than or equal to 50 ind./m<sup>2</sup> but less than 100 ind./m<sup>2</sup>; + the average density is less than 50 ind./m<sup>2</sup>; - Not collected

表2 抚仙湖大型底栖动物的出现率(%)

Table 2 Occurrence frequency (%) of macrozoobenthos in Fuxian Lake

	南区 Southern portion	北区 Northern portion	沿岸区 Near-shore region	湖心区 Open-water region	全湖 Whole lake
寡毛类 Oligochaeta	89.3	81.5	82.6	95.8	85.5
摇蚊幼虫 Chironomidae	85.7	68.5	70.9	100	76.4
软体动物 Mollusca	78.6	61.1	77.9	41.7	70.0
总计 Total	98.2	96.3	96.5	100	97.3

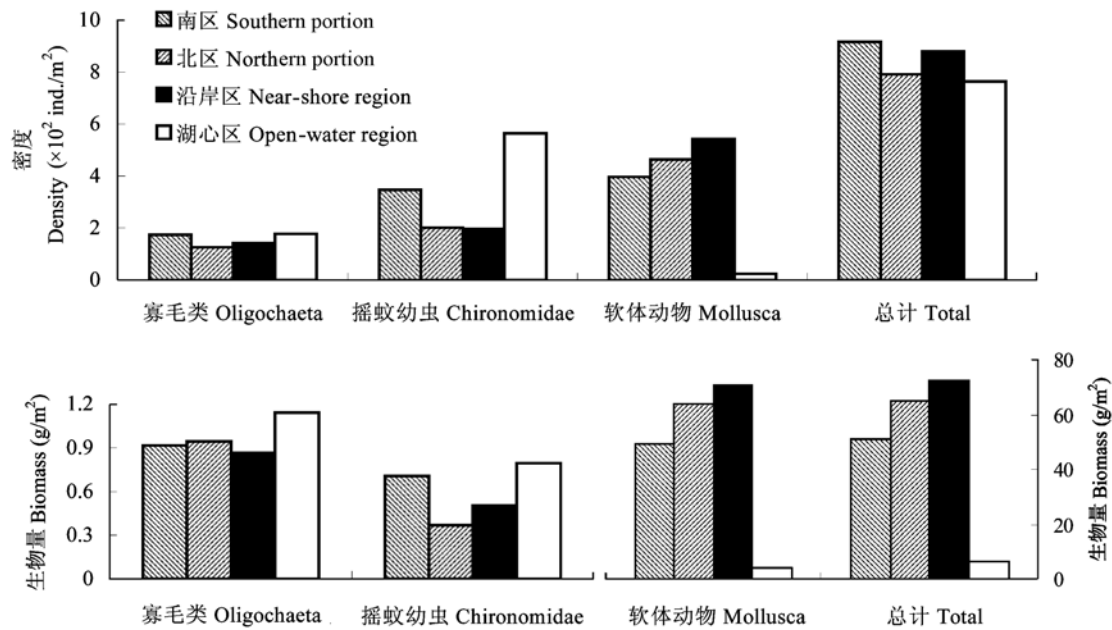


图2 抚仙湖大型底栖动物各类群在不同湖区的密度和生物量比较

Fig. 2 Comparison on density and biomass of different macrozoobenthic taxa in different regions of Fuxian Lake

占17.4%；平均生物量58.01 g/m<sup>2</sup>，其中软体动物占97.3%，寡毛类和摇蚊幼虫分别占1.6%和1.1%。在密度方面，除湖心区外，软体动物均占优势，寡毛类均最小；在生物量方面，不同湖区软体动物均占绝对优势，而寡毛类和摇蚊幼虫所占比例均很小。

底栖动物各类群在不同湖区的密度和生物量见图2。寡毛类南区 and 北区、沿岸区和湖心区的密度( $P > 0.05$ )和生物量( $P > 0.05$ )差异均不显著。摇蚊幼虫南区密度( $P < 0.05$ )和生物量( $P < 0.01$ )均显著大于北区，沿岸区密度显著小于湖心区( $P < 0.01$ )，而生物量之间差异不显著( $P > 0.05$ )。软体动物南区和北区的密度( $P > 0.05$ )和生物量( $P > 0.05$ )差异不显著，而沿岸区密度( $P < 0.01$ )和生物量( $P < 0.01$ )均显著大于湖心区。对全湖底栖动物而言，沿岸区生物量显著大于湖心区( $P < 0.01$ )，而两者之间密度差异不显著( $P > 0.05$ )；南区和北区之间密度( $P > 0.05$ )和生物量( $P > 0.05$ )差异均不显著。

### 3.4 优势种及分布

在底栖动物中，居密度前三位的是花纹前突摇蚊(*Procladius choreus*)(221 ind./m<sup>2</sup>，占总密度的25.6%)、长角涵螺(*Alocinma longicornis*)(117 ind./m<sup>2</sup>，13.6%)和方形环棱螺(*Bellamy quadrata*)(105 ind./m<sup>2</sup>，12.2%)，三者共占总密度的51.4%。在寡毛

类中，霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)和苏氏尾鳃蚓(*Branchiura sowerbyi*)占优势，共占寡毛类密度的48.6%，占生物量的45.4%；在摇蚊幼虫中，花纹前突摇蚊和羽摇蚊(*Chironomus plumosus*)占优势，两者占摇蚊幼虫密度的94.9%，占生物量的97.5%；在软体动物中，长角涵螺、方形环棱螺和河蚬(*Corbicula fluminea*)占优势，共占软体动物密度的57.8%，占生物量的84.9%。

寡毛类和摇蚊幼虫全湖均有分布，寡毛类分布水深范围为1.2–140.9 m，平均为45.0 m；摇蚊幼虫分布水深范围为2.7–149.0 m，平均为49.2 m；而软体动物主要分布在沿岸区，水深范围为1.1–118.0 m，平均为31.0 m。各类群优势种的出现率、分布水深及分布型式见表3。苏氏尾鳃蚓、霍甫水丝蚓和花纹前突摇蚊在全湖范围内均有分布，其中花纹前突摇蚊分布最大水深达149.0 m。其他种类为局部性分布，如羽摇蚊幼虫主要分布在南部沿岸区，长角涵螺和方形环棱螺主要分布在水草区，而河蚬主要分布在沿岸无草区。从表3可以看出，各主要种类的 $I_0$ 指数均明显大于1，其检验值 $F_0$ 均大于 $F_{0.05}(n-1, \infty)$ ，表明它们均呈聚集分布。

### 3.5 多样性分析

抚仙湖大型底栖动物群落的Pielou均匀度指

表3 抚仙湖大型底栖动物各类群优势种的分布  
Table 3 Distribution of the dominant species of macrozoobenthic taxa in Fuxian Lake

种类 Species	出现率 Occurrence frequency (%)	平均水深 Average depth (m)	范围 Range of depth (m)	$I_{\delta}$ index	$F_0$
寡毛类 Oligochaeta					
苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>	51.8	39.4	2.1-134	3.26	4.49*
霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	42.7	28.5	1.2-140.9	6.70	18.37*
摇蚊幼虫 Chironomidae					
花纹前突摇蚊 <i>Procladius choreus</i>	54.6	64.5	2.7-149.0	3.20	31.62*
羽摇蚊 <i>Chironomus plumosus</i>	18.2	11.8	3.4-43.0	10.52	25.21*
软体动物 Mollusca					
长角涵螺 <i>Alocinma longicornis</i>	18.2	8	1.1-32.3	35.40	26.88*
方形环棱螺 <i>Bellamyia quadrata</i>	42.9	10	1.5-31.6	12.89	48.98*
河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>	46.8	24	1.1-77.6	8.15	13.46*

$F_{(0.05)(109, \infty)}=1.24$ , \*  $F_0 > F_{(0.05)(109, \infty)}$

表4 抚仙湖大型底栖动物群落的多样性指数  
Table 4 Diversity indices of macrozoobenthos community in Fuxian Lake

	物种数 No. of Species	Pielou均匀度指数 Pielou evenness index (J)	Margalef丰富度指数 Margalef richness index ( $d_M$ )	Simpson优势度指数 Simpson index (D)	Shannon-Wiener多样性指数 Shannon-Wiener diversity index (H')	改进的Shannon-Wiener多样性指数 Modified Shannon-Wiener diversity index ( $\beta$ )
南区 Southern portion	27	0.70	3.10	0.86	2.28	18.40
北区 Northern portion	27	0.66	3.17	0.83	2.15	16.96
沿岸区 Near-shore region	27	0.76	2.95	0.89	2.46	20.83
湖心区 Open-water region	15	0.39	1.99	0.45	1.05	7.40
全湖 Whole lake	27	0.74	2.88	0.87	2.40	20.84

表5 抚仙湖大型底栖动物密度、生物量与理化因子的相关分析  
Table 5 Correlations between density or biomass of macrozoobenthos and the physical-chemical factors in Fuxian Lake

		水深 Water depth (m)	总氮 Total nitrogen of water (mg/L)	总磷 Total phosphorous of water (mg/L)	叶绿素a Chlorophyll a (ug/L)	总有机碳 Total organic carbon of sediment (g/kg)	全氮 Total nitrogen of sediment (g/kg)	全磷 Total phosphorous of sediment (g/kg)	溶解氧 Dissolved oxygen (g/L)
密度 Density (ind./m <sup>2</sup> )	Pearson 相关系数 Pearson correlation	-0.146	0.015	0.059	0.184	0.275*	0.260	0.031	0.266*
	显著性检验值(两尾) Sig. (2-tailed)	0.132	0.874	0.543	0.054	0.038	0.051	0.817	0.018
	样本数 No. of samples	110	110	110	110	57	57	57	78
生物量 Biomass (g/m <sup>2</sup> )	Pearson 相关系数 Pearson correlation	-0.352**	-0.033	0.026	-0.018	0.189	0.166	0.025	0.423**
	显著性检验值(两尾) Sig. (2-tailed)	0.000	0.729	0.788	0.852	0.160	0.216	0.856	0.000
	样本数 No. of samples	110	110	110	110	57	57	57	78

\*\*  $P < 0.01$ ; \*  $P < 0.05$

数、Margalef丰富度指数、Simpson优势度指数、Shannon-Wiener多样性指数及改进的Shannon-

Wiener多样性指数分别为0.74、2.88、0.87、2.40和20.84(表4)。南区底栖动物Margalef丰富度指数略低

于北区,但其Shannon-Wiener多样性指数、改进的Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数和Simpson优势度指数均略高于北区,表明南区底栖动物的多样性略高于北区。沿岸区物种数、密度和生物量均大于湖心区,多样性指数也均明显大于湖心区,表明沿岸区底栖动物多样性明显高于湖心区。

### 3.6 环境分析

将底栖动物密度和生物量与水深、水体总氮、总磷、叶绿素a、表层沉积物总有机碳、全氮、全磷、底层水体溶解氧等理化因子进行相关分析(表5),结果表明底栖动物密度与表层沉积物总有机碳、底层水体溶解氧显著正相关( $P<0.05$ ),生物量与底层水体溶解氧极显著正相关( $P<0.01$ ),与水深极显著负相关( $P<0.01$ )。偏相关分析表明,以溶解氧为控制变量时,底栖动物生物量与水深相关关系不显著( $P>0.05$ ),以水深为控制变量时,生物量与溶解氧显著正相关( $P<0.01$ ),因此可以认为,底层水体溶解氧是影响底栖动物生物量分布的关键理化因子。

## 4 讨论

### 4.1 抚仙湖底栖动物群落特征及变化趋势

一般认为,底栖动物密度和生物量与水深之间存在着反向关系,即随着水深的增大,密度和生物量逐渐降低。如在浅水湖泊东湖,水深增加1 m,底

栖动物密度减少330 ind./m<sup>2</sup>(陈其羽和吴天惠,1990)。但不同的类群对水深的要求不同,如软体动物的一些种类,超过一定水深就没有分布了;而寡毛类在深水区的现存量有时很大,如丹江口水库坝前47 m深处寡毛类达到最大值(梁彦龄和王洪铸,2000)。抚仙湖为典型的深水湖泊,其底栖动物的群落结构也表现出一定特殊性,如摇蚊幼虫和寡毛类在湖心区的出现率和密度均大于沿岸区,且摇蚊幼虫的密度分布与水深呈显著正相关(熊飞等,2007)。本研究结果表明,对抚仙湖底栖动物整体而言,影响其密度分布的关键理化因子为表层沉积物总有机碳和底层水体溶解氧,影响其生物量分布的关键理化因子为底层水体溶解氧。

2005年和1980年抚仙湖底栖动物调查结果见表6(中国科学院南京地理与湖泊研究所,1990)。20多年来,抚仙湖摇蚊幼虫密度和生物量平均值均增加到原来的1.7倍,寡毛类密度和生物量却显著下降,平均值分别约为1980年的1/4和1/5。软体动物随着仿雕石螺(*Lithoglyphopsis* spp.)的消失,其密度和生物量显著下降,仅为原来的13.6%和37.3%。前后相比,摇蚊幼虫物种丰富度指数呈下降趋势,而寡毛类和软体动物物种丰富度指数呈上升趋势。

从优势种变化看,寡毛类变化不大,摇蚊幼虫中出现了羽摇蚊,并成为南区的优势种。软体动物在20世纪50年代时狭布种螺蛳(*Margarya*)占优势,

表6 2005年和1980年抚仙湖底栖动物调查结果比较

Table 6 Comparison of survey results of zoobenthos in Fuxian Lake between 1980 and 2005

类群 Groups	寡毛类 Oligochaeta	摇蚊幼虫 Chironomidae	软体动物 Mollusca	总计 Total
物种数 Number of species	8	9	10	27
Margalef丰富度指数 Margalef richness index	1.11	1.57	1.07	3.03
密度 Density (ind./L)	560	164	4,569	5,293
生物量 Biomass (g/m <sup>2</sup> )	5.28	0.38	218.30	223.96
优势种 Dominant species	苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i> 颤蚓 <i>Tubifex</i> sp.	花纹前突摇蚊 <i>Procladius choreus</i>	仿雕石螺 <i>Lithoglyphopsis</i> spp. 短沟蜷 <i>Semisulcospira</i> sp.	-
	2005 苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i> 水丝蚓 <i>Limnodrilus</i> sp.	2005 花纹前突摇蚊 <i>Procladius choreus</i> 羽摇蚊 <i>Chironomous plumosus</i>	2005 长角涵螺 <i>Alocinma longicornis</i> 方形环棱螺 <i>Bellamyia quadrata</i> 河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>	-

表7 抚仙湖与其他湖泊底栖动物比较

Table 7 Comparison of zoobenthos between Fuxian Lake and other lakes

		寡毛类 Oligochaeta	摇蚊幼虫 Chironomidae	软体动物 Mollusca	总计 Total	数据来源 Data sources
抚仙湖 Fuxian Lake	物种数 No. of species	12	6	9	27	本研究 Present study
	密度 Density (ind./m <sup>2</sup> )	150	275	430	855	
	Margalef丰富度指数 Margalef richness index	2.2	0.89	1.32	3.85	
鄱阳湖 Poyang Lake	物种数 No. of species	12	17	66	95	谢钦铭等, 1995
	密度 Density (ind./m <sup>2</sup> )	56	90	578	724	
	Margalef丰富度指数 Margalef richness index	2.73	3.56	10.22	14.28	
扁担塘 Biantantang Lake	物种数 No. of species	29	22	17	68	闫云君等, 2005
	密度 Density (ind./m <sup>2</sup> )	143	344	294	781	
	Margalef丰富度指数 Margalef richness index	5.64	3.60	2.82	10.06	
洱海 Erhai Lake	物种数 No. of species	—	—	—	30	吴庆龙和王云飞, 1999
	密度 Density (ind./m <sup>2</sup> )	371	2,025	6,475	1,219	
	Margalef丰富度指数 Margalef richness index	—	—	—	4.08	
滇池 Dianchi Lake	物种数 No. of species	6	5	—	11	王丽珍等, 2003
	密度 Density (ind./m <sup>2</sup> )	6,841	4,707	—	11,548	
	Margalef丰富度指数 Margalef richness index	0.7	0.47	—	1.07	

80年代螺蛳逐渐消失, 仿雕石螺和短沟蜷(*Semisulcospira*)占优势, 而目前主要种类为长角涵螺、方形环棱螺和河蚬等广布种。

底栖动物的分布变化主要反映在软体动物分布变化方面。1980年仿雕石螺在沿岸区呈块状或条带状分布, 其他种类如环棱螺、圆田螺和萝卜螺等仅在海口河两侧滩地的沉水植物区分布。而目前, 长角涵螺、环棱螺、拟沼螺、椭圆萝卜螺和河蚬等种类全湖沿岸区均有一定分布。

底栖动物种类和群落结构的变化受食物竞争、捕食、疾病、污染、溶解氧等多方面的影响(Petur, 1984; Lathrop, 1992; Lozano *et al.*, 2001)。深水底栖动物主要以上层沉降下去的藻类和碎屑物质为食, 抚仙湖藻类种类和数量不断增加, 为底栖动物提供了充足的食物。2005年6-7月调查期间, 抚仙湖深水区底层溶解氧约为3 mg/L, 基本能满足深水区底栖动物的氧需求, 但与1980年相比溶解氧表现出下降趋势, 可能对某些底栖动物造成一定的负面影响。抚仙湖鱼类主要为浮游动物食性鱼类, 底栖动物食性的鱼类不多, 因此可以认为鱼类对底栖动物群落影响不大。污染对底栖动物群落会造成很大影响, 随着入湖污染物增多, 抚仙湖营养水平在不断提

高, 沉积物环境的变化可能是造成某些底栖动物如螺蛳和仿雕石螺消失的原因, 这有待进行深入研究。抚仙湖沿岸区发育不全, 缺少大型挺水植物, 缺少了一道拦截和沉降入湖污染物的天然屏障, 因此沿岸区的水质较差, 这为耐污种类如羽摇蚊的生存提供了条件。营养水平的提高, 也为沉水植物的发展提供了营养基础, 20多年来, 抚仙湖沉水植物得到了一定发展, 特别是穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)和鳇齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)等耐污群落迅速发展, 为喜草性软体动物的发展提供了条件, 促进了底栖动物多样性的提高。

#### 4.2 与其他湖泊的比较

与长江中下游平原湖泊相比, 抚仙湖底栖动物密度偏高, 但其种类数和物种丰富度明显偏低(表7)。鄱阳湖为我国第一大淡水湖, 且为通江湖泊, 湖泊发育比较完全, 生境多样性高, 其软体动物种类较多, 瓣鳃类种类高达52种(谢钦铭等, 1995), 而2005年在抚仙湖只采到河蚬1种。扁担塘为典型的小型浅水草型湖泊, 水生植物几乎全湖分布, 湖泊生态系统具有较高的空间异质性, 为底栖动物提供了良好的栖息、生活、摄食和繁殖场所。而抚仙湖为典型的深水湖泊, 岸带发育不完全, 缺少大型挺



水植物分布,其沉水植物分布也只占湖泊面积的 1.51%(熊飞等, 2006),致使广大深水区域只有寡毛类和摇蚊幼虫分布,而缺少软体动物,从而有利于部分优势种类发展,降低了底栖动物多样性。抚仙湖沿岸区底栖动物多样性远高于湖心区,也表明水生植物在维持底栖动物多样性方面具有重要作用。

洱海、滇池与抚仙湖同属云南高原湖泊,洱海为中等深水湖泊,有一定程度的富营养化,滇池为浅水湖泊,已严重富营养化,而抚仙湖正由贫营养向中营养过渡,三者底栖动物的物种多样性为洱海 > 抚仙湖 > 滇池。洱海的营养水平较抚仙湖高,为底栖动物提供了丰富的食物来源,且其沉水植物分布面积占全湖的 40.39%(胡小贞等, 2005),提高了湖泊生态系统结构的异质性,因此其底栖动物种类、密度和物种丰富度都略高于抚仙湖。而滇池由于严重富营养化,湖泊生态系统处于恶性循环状态,沉水植物覆盖率也由 20 世纪 50 年代的 90% 下降到 90 年代的 3%(罗民波等, 2006),湖泊空间异质性降低,物种多样性下降,底栖动物群落结构也趋于单一化,以摇蚊幼虫和寡毛类为主,且密度很高。

致谢: 中国科学院南京地理与湖泊研究所 2004 级博士生夏天翔参与采样,中国科学院水生生物研究所崔永德博士在寡毛类鉴定方面提供了帮助,谨表谢意!

## 参考文献

- Cai LZ (蔡立哲) (2003) Macrozoobenthos pollution index (MPI). *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), **23**, 625–629. (in Chinese with English abstract)
- Chen QY (陈其羽), Wu TH (吴天惠) (1990) Zoobenthos. In: *Studies on Ecology of Lake Donghu (No.1)* (东湖生态学研究(一)) (ed. Liu JK (刘建康)), pp. 144–152. Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Cui YD, Wang HZ (2005) *Potamothenis scleropenis* sp. nov. (Oligochaeta: Tubificidae) from Fuxian Lake, the deepest lake in southwest China. *Zoological Science*, **22**, 1353–1357.
- Gong ZJ (龚志军), Xie P (谢平), Tang HJ (唐汇娟), Wang SD (王士达) (2001) The influence of eutrophication upon community structure and biodiversity of macrozoobenthos. *Acta Hydrobiologica Sinica* (水生生物学报), **25**, 210–216. (in Chinese with English abstract)
- Goran M (1994) Oligochaetes and water pollution in two deep Norwegian lakes. *Hydrobiologia*, **278**, 213–222.
- Hu XZ (胡小贞), Jin XC (金相灿), Du BH (杜宝汉), Zhu J (朱江) (2005) Submerged macrophyte of Lake Erhai and its dynamic change. *Research of Environmental Sciences* (环境科学研究), **18**, 1–4. (in Chinese with English abstract)
- Huang XF (黄祥飞) (1999) *Survey, Observation and Analysis of Lake Ecology* (湖泊生态调查观测与分析), pp. 92–94. Standards Press of China, Beijing. (in Chinese)
- Hutchinson GE (1993) *A Treatise on Limnology: The Zoobenthos* (Vol. 4). John Wiley and Sons Inc., New York.
- Jiang PH (姜莘红), Liang XM (梁小民), Chen F (陈芳), Zhou YY (周易勇), Wang HZ (王洪铸) (2006) Indication of macrophyte-restorable area by spatial pattern of macrobenthos in Yuehu Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), **15**, 502–505. (in Chinese with English abstract)
- Klemm DJ, Blocksom KA, Thoeny WT, Fulk FA, Herlihy AT, Kaufmann PR, Cormier SM (2002) Methods development and use of macroinvertebrates as indicators of ecological conditions for stream in the Mid-Atlantic Highlands Region. *Environmental Monitoring and Assessment*, **78**, 169–212.
- Lars H, Viktor VB (2003) Modelling production and biomasses of zoobenthos in lakes. *Aquatic Ecology*, **37**, 277–306.
- Lathrop RC (1992) Decline in zoobenthos densities in the profundal sediments of Lake Mendota (Wisconsin, USA). *Hydrobiologia*, **235/236**, 353–361.
- Li YX (李荫玺), Wang L (王林), Qi YK (祁云宽), Tang F (唐芳) (2007) The analysis of the phytoplankton development trend on Fuxian Lake. *Journal of Lake Sciences* (湖泊科学), **19**, 223–226. (in Chinese with English abstract)
- Liang YL (梁彦龄), Wu TH (吴天惠), Xie ZC (谢志才) (1995) The status and fishery assessment of zoobenthos in Bao'an Lake. In: *Resources, Environment and Fishery Ecological Management of Macrophytic Lake (No. 1)* (草型湖泊资源、环境与渔业生态学管理(一)) (eds Liang YL (梁彦龄), Liu HQ (刘伙泉)), pp. 178–193. Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Liang YL (梁彦龄), Wang HZ (王洪铸) (2000) Zoobenthos. In: *Advanced Hydrobiology* (高级水生生物学) (ed. Liu JK (刘建康)), pp. 251–259. Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Lindgaard C (1992) The role of zoobenthos in energy flow in deep, oligotrophic Lake Thingvallavatn, Iceland. *Hydrobiologia*, **243/244**, 185–195.
- Liu YY (刘月英), Zhang WZ (张文珍), Wang YX (王跃先), Wang EY (王恩义) (1979) *Economic Fauna of China—Freshwater Mollusca* (中国经济动物志·淡水软体动物). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Lozano SJ, Scharold JV, Nalepa TF (2001) Recent declines in benthic macroinvertebrate densities in Lake Ontario. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **58**, 518–529.
- Luo MB (罗民波), Duan CQ (段昌群), Shen XQ (沈新强), Yang L (杨良) (2006) Environmental degradation and loss of species diversity in Dianchi Lake. *Marine Fisheries* (海洋渔业), **28**, 71–78. (in Chinese with English abstract)
- Ma KM (马克明), Kong HM (孔红梅), Guan WB (关文彬),

- Fu BJ (傅伯杰) (2001) Ecosystem health assessment: methods and directions. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **21**, 2106–2116. (in Chinese with English abstract)
- Margalef DR (1957) Information theory in ecology. *General Systems*, **3**, 36–37.
- Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences (中国科学院南京地理与湖泊研究所) (1990) *Lake Fuxian* (抚仙湖), pp. 1–3. Ocean Press, Beijing. (in Chinese)
- Petur MJ (1984) Oxygen demand and long term changes of profundal zoobenthos. *Hydrobiologia*, **115**, 121–126.
- Pielou EC (1975) *Ecological Diversity*. Wiley-Inters, New York.
- Shannon CE, Wiener WJ (1949) *The Mathematical Theory of Communication*, p. 117. University of Illinois Press, Urbana.
- Simpson EH (1949) Measurement of diversity. *Nature*, **163**, 688.
- Vander Zanden MJ, Chandra S, Park SK, Vadeboncoeur Y, Goldman CR (2006) Efficiencies of benthic and pelagic trophic pathways in a subalpine lake. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **63**, 2608–2620.
- Wang BX (王备新), Yang LF (杨莲芳) (2001) Advances in rapid bio-assessment of water quality using benthic macroinvertebrates. *Journal of Nanjing Agriculture University* (南京农业大学学报), **24**, 107–111. (in Chinese with English abstract)
- Wang BX (王备新), Yang LF (杨莲芳), Hu BJ (胡本进) (2005) A preliminary study on the assessment of stream ecosystem health in south of Anhui Province using Benthic-Index of Biotic Integrity. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **25**, 1481–1490. (in Chinese with English abstract)
- Wang HZ (王洪铸) (2002) *Studies on Taxonomy, Distribution and Ecology of Microdrile Oligochaetes of China, with Descriptions of Two New Species From the Vicinity of the Great Wall Station of China, Antarctica* (中国小蚓类研究—附中国南极长城站附近地区两新种). Higher Education Press, Beijing. (in Chinese)
- Wang LZ (王丽珍), Liu YD (刘永定), Chen XD (陈旭东), Li XP (李小平), Xiao BD (肖帮定), Chen L (陈亮) (2003) Community structure of macroinvertebrates and evaluation of water quality in Macunwan and Haidongwan in Dianchi Lake. *Reservoir Fisheries* (水利渔业), **23**, 47–48, 50. (in Chinese with English abstract)
- Wang SB (王寿兵) (2003) A question on the traditional biodiversity index. *Journal of Fudan University (Natural Science)* (复旦学报(自然科学版)), **42**, 867–868, 874. (in Chinese with English abstract)
- Wang SD, Wang XH (1994) Chironomidae. In: *Aquatic Insects of China Useful For Monitoring Water Quality* (eds John CM, Yang LF, Tian LX), pp. 489–532. Hohai University Press, Nanjing.
- Wang YD (王银东), Xiong BX (熊邦喜), Yang XF (杨学芬) (2005) Community of macrozoobenthos in Lake Nanhu, China. *Journal of Lake Sciences* (湖泊科学), **17**, 327–333. (in Chinese with English abstract)
- Wu HJ (邬红娟), Cui B (崔博), Lü J (吕晋) (2005) A community structure of benthos and ecological assessment of water quality of shallow lakes in Wuhan. *Journal of Huazhong University of Science & Technology (Nature Science Edition)* (华中科技大学学报自然科学版), **33**, 96–98. (in Chinese with English abstract)
- Wu QL (吴庆龙), Wang YF (王云飞) (1999) On the succession of aquatic communities in Erhai Lake. *Journal of Lake Sciences* (湖泊科学), **11**, 267–273. (in Chinese with English abstract)
- Xie QM (谢钦铭), Li Y (李云), Xiong GG (熊国根) (1995) Studies on the ecology of zoobenthos and the estimation of bottom-fish productivity in Poyang Lake. *Jiangxi Science* (江西科学), **13**, 161–170. (in Chinese with English abstract)
- Xiong F (熊飞), Li WC (李文朝), Pan JZ (潘继征) (2007) Spatial distribution of chironomid larvae and its environmental analysis in Lake Fuxian, Yunnan Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **18**, 179–184. (in Chinese with English abstract)
- Xiong F (熊飞), Li WC (李文朝), Pan JZ (潘继征), Li AQ (李爱权), Xia TX (夏天翔) (2006) Distribution and community structure characteristics of submerged macrophytes in Lake Fuxian, Yunnan Province. *Acta Botanica Yunnanica* (云南植物研究), **28**, 277–282. (in Chinese with English abstract)
- Xiong JL (熊金林), Mei XG (梅兴国), Hu CL (胡传林) (2003) Comparative study on the community structure and biodiversity of zoobenthos in lakes of different pollution states. *Journal of Lake Sciences* (湖泊科学), **15**, 160–168. (in Chinese with English abstract)
- Yan YJ (闫云君), Li XY (李晓宇), Liang YL (梁彦龄) (2005) A comparative study on community structure of macrozoobenthos between macrophytic and algal lakes. *Journal of Lake Sciences* (湖泊科学), **17**, 176–182. (in Chinese with English abstract)
- Yan YJ (闫云君), Liang YL (梁彦龄) (2004) The comparison on secondary production of macrozoobenthos between a typical algal lake and a typical macrophytic lake. *Journal of Lake Sciences* (湖泊科学), **16**, 81–84. (in Chinese with English abstract)
- Yan YJ, Liang YL (2002) Abundance and production of *Limnodrilus hoffmeisteri* (Oligochaeta: Tubificidae) in algae-dominated Lake Houhu. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, **20**, 81–85.
- Zhang X, Xie P, Chen FZ, Li YL, Li SX, Guo NC, Qin JH (2005) Present status and changes of the phytoplankton community after invasion of *Neosalanx taihuensis* since 1982 in a deep oligotrophic plateau lake, Lake Fuxian in the subtropical China. *Journal of Environmental Sciences*, **17**, 389–394.

(责任编辑: 闫文杰)