

王小毛, 欧伏平, 王丑明, 等. 洞庭湖底栖动物长期演变特征及影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(2): 336–345.

WANG Xiao-mao, OU Fu-ping, WANG Chou-ming, et al. Long-term evolution and influencing factors of macrozoobenthos in Dongting Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(2): 336–345.

# 洞庭湖底栖动物长期演变特征及影响因素分析

王小毛<sup>1</sup>, 欧伏平<sup>1\*</sup>, 王丑明<sup>1</sup>, 田琪<sup>1</sup>, 黄谦<sup>1</sup>, 张雷<sup>2</sup>, 卢少勇<sup>2</sup>

(1.湖南省洞庭湖生态环境监测中心, 国家环境保护洞庭湖科学观测研究站, 湖南 岳阳 414000; 2.中国环境科学研究院, 国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

**摘要:**为揭示洞庭湖底栖动物种群长期变化趋势及环境影响, 利用20多年的监测数据分析洞庭湖底栖动物种群组成、优势种、多样性指数变化动态, 并应用典范对应分析(RDA)研究了底栖动物种群结构与环境因子的影响。结果表明: 1991—2012年洞庭湖底栖动物多年平均种数53种, 以水生昆虫(占41.5%)、软体类(占39.6%)为主。全时段水生昆虫种数、密度整体呈缓慢下降趋势; 软体动物密度基本平稳, 种数整体呈缓慢上升趋势。2010年以后优势种由水生昆虫、软体类与钩虾等为主的清洁型种类向以寡毛类、软体类等为主的清洁型与耐污型种类转变。东洞庭湖底栖动物种数、密度与多样性指数均低于西、南洞庭湖。RDA分析结果显示, 洞庭湖水体总磷、叶绿素a和透明度是影响底栖动物种群的主要水环境因素。三峡工程运行后入湖水沙减少、水位变化对底栖动物种群有一定的负面影响。

**关键词:**洞庭湖; 三峡工程; 底栖动物; 环境因子; 影响分析

中图分类号: X524 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)02-0336-10 doi:10.11654/jaes.2016.02.018

## Long-term evolution and influencing factors of macrozoobenthos in Dongting Lake

WANG Xiao-mao<sup>1</sup>, OU Fu-ping<sup>1\*</sup>, WANG Chou-ming<sup>1</sup>, TIAN Qi<sup>1</sup>, HUAN Qian<sup>1</sup>, ZHANG Lei<sup>2</sup>, LU Shao-yong<sup>2</sup>

(1. Ecological and Environmental Monitoring Center of Dongting Lake of Hunan, State Environmental Protection Scientific Observation and Research Station for Lake Dongtinghu (SEPSORS LD), Yueyang 414000, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** In this study, the recent 20 year monitoring data were collected to analyze the variations of population composition, dominant species and biodiversity index of macrozoobenthos in Dongting Lake. The RDA method was also employed to examine the relationships between macrozoobenthos and environmental factors. Results showed that (1) the average richness of macrozoobenthos was 53 species in 22 years, and the main species were aquatic insects (41.5%) and mollusk (39.6%). (2) Species number and density of aquatic insects overall showed a slowly declining trend, while the density of mollusks basically kept stable, and species of mollusks showed a slowly increasing trend. (3) After 2010, the dominant species shifted from clean water typed aquatic insect, mollusk and gammarid to clean water typed and pollution-tolerant oligochaetes and mollusk. (4) The macrozoobenthos species, density and biodiversity in Eastern Dongting Lake were lower than those in Western and Southern Dongting Lake. (5) TP, chl-a and transparency were main factors influencing the population composition of macrozoobenthos in Dongting Lake. The loss of water and sediment influx from upstream rivers and the variation of water level resulted from operation of the Three Gorges Project had negative effects on the population composition of macrozoobenthos.

**Keywords:** Dongting Lake; Three Gorges Project; macrozoobenthos; environmental factor; influence

收稿日期: 2015-08-12

基金项目: 全国重点湖泊水库生态安全保障方案项目(WFLY-2009-01-PG05); 湖南省环保科技计划项目(2011-19); 长江三峡水利枢纽工程竣工环境保护验收专题-18; 洞庭湖调查项目(2014)

作者简介: 王小毛(1964—), 女, 湖南益阳人, 学士, 工程师, 主要从事环境监测工作。E-mail: wxm2633363@126.com

\* 通信作者: 欧伏平 E-mail: oufuping1964@163.com

大型底栖无脊椎动物是湖泊、河流生态系统的重要类群,既是鱼类的天然食物资源,同时也在湖泊和河流的物质循环和能量流动等方面发挥着重要作用<sup>[1-2]</sup>。底栖动物生存于水底,移动能力较差,生活史较长,对环境变化较为敏感,是优良的环境指示生物,可以有效地指示水生生态系统的健康状况。欧美发达国家及我国大量研究表明,大型底栖动物与环境因子的关系密切<sup>[3-6]</sup>,长期以来被广泛应用于水生生态系统的健康与水质评价中<sup>[7-12]</sup>。近年来,因典范对应分析(RDA)结果直观,包含的信息量大,常用来研究水生生物群落与水环境因子的相关关系<sup>[13-14]</sup>。然而,我国关于利用底栖动物群落结构的长期变化趋势研究湖泊、河流环境演变的报道较少<sup>[15-16]</sup>。

洞庭湖为我国第二大淡水湖,承纳湘江、资江、沅江、澧水四水、荆江三口及区间的来水,江湖关系复杂。洞庭湖作为长江中下游重要的“江河吞吐器”和国际重要的湿地保护区,在维系区域生态平衡中具有举足轻重的地位。近20多年来,受自然和人类活动共同影响,洞庭湖污染加重,尤其三峡工程运行后,洞庭湖水系格局不断地发生调整变化,对湖泊演变和水情、水质产生了直接或间接影响<sup>[17-21]</sup>,从而影响洞庭湖水生态系统的稳定。自20世纪80年代初期以来,关于洞庭湖底栖动物的研究较多,除文献[22]利用间隔几年数据进行过底栖动物群落结构变化特征及三峡工

程粗略的影响分析外,其余基本集中在单一年份大型底栖动物的水质评价<sup>[12,23-24]</sup>以及底栖动物与环境因子的关系研究方面<sup>[14,25]</sup>。但由于这些研究年限单一或者研究年份少且不连续,均不足以全面体现洞庭湖底栖动物变化特征及环境影响。本文利用20余年连续监测数据,分析洞庭湖底栖动物种群长期的变化特征,并应用典范对应分析(RDA)与环境因子的关系,同时探讨三峡工程的影响,对于揭示三峡工程运行后湖泊生态环境演变规律具有重要意义,可为湖泊管理提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

洞庭湖水质、生物监测始于20世纪80年代初,由于断面的多次调整,为便于研究,选取东、南、西洞庭湖水域有连续数据的典型代表断面作为研究区域,能够较好地反映洞庭湖底栖动物种群变化整体与区域特征。各区域断面的具体为(图1):东洞庭湖区域的D1(鹿角)、D2(东洞庭湖)、D3(岳阳楼)断面;南洞庭湖区域的N1(万子湖)、N2(横岭湖)、N3(虞公庙)断面;西洞庭湖区域的S1(南嘴)、S2(目平湖)、S3(小河嘴)断面。

### 1.2 采样方法

每断面采左、中、右或左、右点,在每点位用1/16

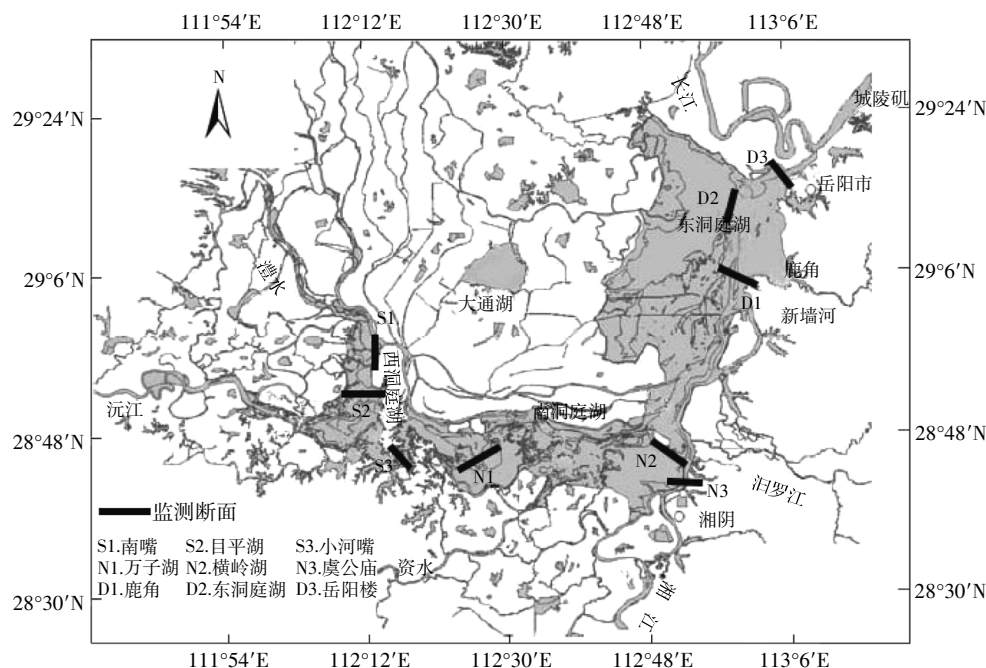


图1 洞庭湖底栖动物采样断面分布图

Figure 1 Locations of macrobenthos sampling in Dongting Lake

彼得生采泥器视情况定量采集 1~2 次混样,混合后经 40 目分样筛筛洗,在解剖瓷盘中逐一分拣出底栖动物。寡毛类用 4%~10% 福尔马林固定,水生昆虫、软体动物等以 75% 的酒精保存,带回室内镜鉴定计数。每个断面的底栖动物数量取左、右采样点的平均值。

### 1.3 数据分析

1990—2012 年的生物监测和包括总磷、总氮、叶绿素 a、透明度、COD<sub>Mn</sub>、DO、pH、氨氮、水温等在内的 21 项水体理化原始数据来源于湖南省洞庭湖生态环境监测中心。每个断面的水体理化数据取左、中、右采样点的平均值。采用 SPSS 13.0 软件进行数据统计。

Shannon-Wiener 多样性指数(HJ 710.8—2014):

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln(P_i)$$

式中: $H'$  为群落多样性指数; $S$  为种数; $P_i$  为样品中属于  $i$  种的个体比例,如样品总数为  $N$ ,第  $i$  种个体数为  $n_i$ ,则  $P_i = n_i / N$ 。

水质  $H'$  指数评价标准: $H' < 1$  为重度污染; $1 \leq H' \leq 2$  为中度污染; $2 < H' \leq 3$  为轻度污染; $H' > 3$  为清洁。

水质评价采用环保部环办[2011]22 号文《地表水环境质量评价办法(试行)》的评价方法,其中水质评价指标包括《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)表 1 的基本项目 21 项(水温、TN 和粪大肠菌群不参与水质类别评价)。

采用约束排序(Constrained ordination)分析洞庭湖底栖动物群落分布与环境因子之间的关系。环境参数平均并进行自然对数转化后,作为环境数据源;大型底栖动物群落组成作为生物数据源,构成环境因子与种类矩阵。为了优化分析,底栖动物群落数据进行  $\lg(x+1)$  转化,具有较高偏相关关系的环境因子( $r > 0.80$ )

和膨胀因子(Inflation factor)大于 20 的环境因子均被剔除。用前向选择(Forward selection),以显著性水平为 0.05 和蒙特卡罗置换检验(499 permutations)确定对底栖动物分布具有重要并独立作用的最少变量组合,该最小变量组用于最终的 RDA 中。采用 Canoco for Windows 4.5 软件对物种数据和环境数据进行趋势对应分析(RDA)。

## 2 结果与分析

### 2.1 底栖动物群落结构组成与变化趋势

#### 2.1.1 群落结构与种类、密度年变化

1991—2012 年洞庭湖全湖共调查到底栖动物 4 门 7 纲 229 属(种),其中软体动物门 84 种,寡毛纲 28 种,昆虫纲 105 种,蛭纲 7 种,甲壳纲 4 种,线形动物门 1 种。全时段底栖动物种数变化范围在 24~86 种之间,多年平均种类数 53 种,以水生昆虫和软体动物为主,分别占 41.5% 和 39.6%,寡毛类占 13.2%,其他(蛭纲、甲壳纲、线形动物门)占 5.7%。

全湖底栖动物种数整体基本呈现 2 个时段(1991—2001 年和 2003—2012 年,2002 年末监测)的下降趋势(图 2)。1991—2001 年,底栖动物种数呈波动下降趋势,从 1991 年的 86 种下降至 2001 年的 33 种;2003—2004 年底栖动物种数较 2001 年增幅较大,为 65~70 种,之后至 2011 年呈明显下降趋势,再至 2012 年又出现小幅度恢复性增加。第二时段平均种数较第一时段略减少 3 种。区域分布上,东、南、西洞庭湖种数变化范围分别在 9~36、16~52、13~60 种之间,平均种数分别为 23、35、32 种。第一时段,南洞庭湖种数最高,东洞庭湖最低;第二时段,西洞庭湖种数最高,东洞庭湖依然最低。

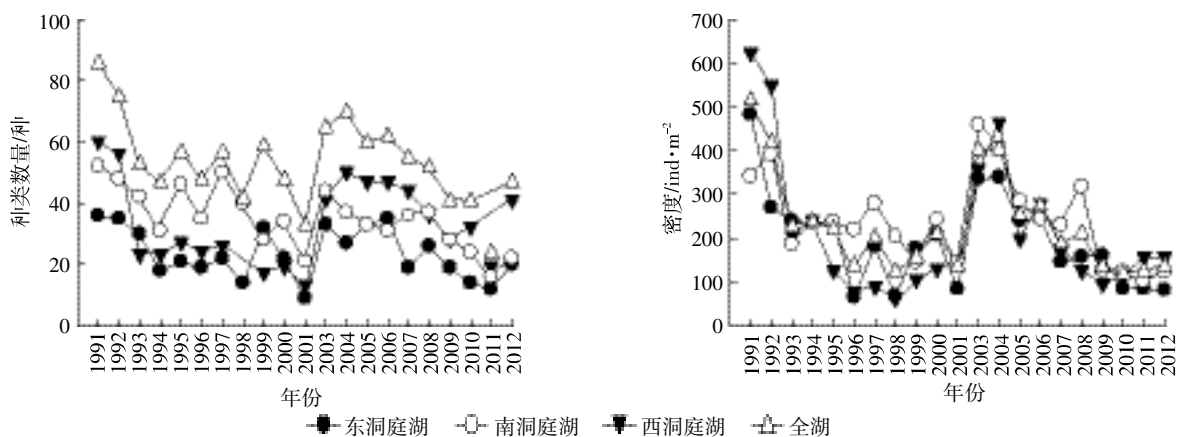


图 2 大型底栖动物种数、密度年变化

Figure 2 Species number and population density of macrobenthos over years

底栖动物密度年变化具有与种类数基本相同的趋势(图2),全湖密度在  $120\sim 517 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$  之间,平均密度  $231 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$ ,第二时段平均密度较第一时段略减少  $10 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$ 。区域分布上,东、南、西洞庭湖密度范围分别在  $65\sim 483$ 、 $101\sim 459$ 、 $60\sim 621 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$  之间,平均密度分别为  $196$ 、 $239$ 、 $210 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$ ,以南洞庭湖密度最高,东洞庭湖最低。

### 2.1.2 底栖动物种群结构组成年变化

图3显示,水生昆虫、软体动物是洞庭湖主要种群,两者种数在各年份所占的比例基本保持在80%左右。1991—2008年,水生昆虫占优势,2009—2012年软体动物占优势。全时段水生昆虫比例呈缓慢下降趋势,软体动物呈缓慢上升趋势。

东、南、西洞庭湖种群组成变化趋势与全湖基本相同,水生昆虫、软体动物种群全时段占优,其平均所占比例分别高达78%、76%、75%。而两者在互为消长的时间变化节点上略有差异,东、南、西三湖水生昆虫种数分别在1991—2004、1991—2007、1991—2008年占优势,其他时段则软体动物占优势。

全时段全湖底栖动物种群密度组成变化趋势表

现为水生昆虫呈下降趋势(图4),软体动物基本稳定,寡毛类呈相对上升趋势。1993—2008年,水生昆虫、软体动物密度占优势,两者比例基本保持在75%~86%之间,2009—2012年,水生昆虫密度比例较低,其中2009、2011、2012年比例不足13%,而此期间,寡毛类密度在22%~37%之间,上升幅度较大。

东、南、西洞庭湖种群组成密度时空分布与全湖也基本相似。东洞庭湖水生昆虫密度2003—2012年下降幅度大,较之前时段降幅达39%,西、南洞庭湖寡毛类上升趋势相对明显。

### 2.1.3 优势种变化

洞庭湖底栖动物多度超过10%的物种见表1。洞庭湖主要的优势种为水生昆虫类的指突隐摇蚊(*Cryptochironomus digitatus*)、齿斑摇蚊(*Stictochironomus* sp.)、蜉蝣(*Ephemera* sp.)等,软体类的河蚬(*Corbicula fluminea*)、短沟蜷(*Semisulcospira* sp.)、河螺(*Rivularia* sp.)、球蚬(*Sphaerium* sp.)、梨形环棱螺(*Bellamya purificata*)、铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*)等,寡毛类的苏氏尾鳃蚓(*Branchiura sowerbyi*)、霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*),其他类的钩虾

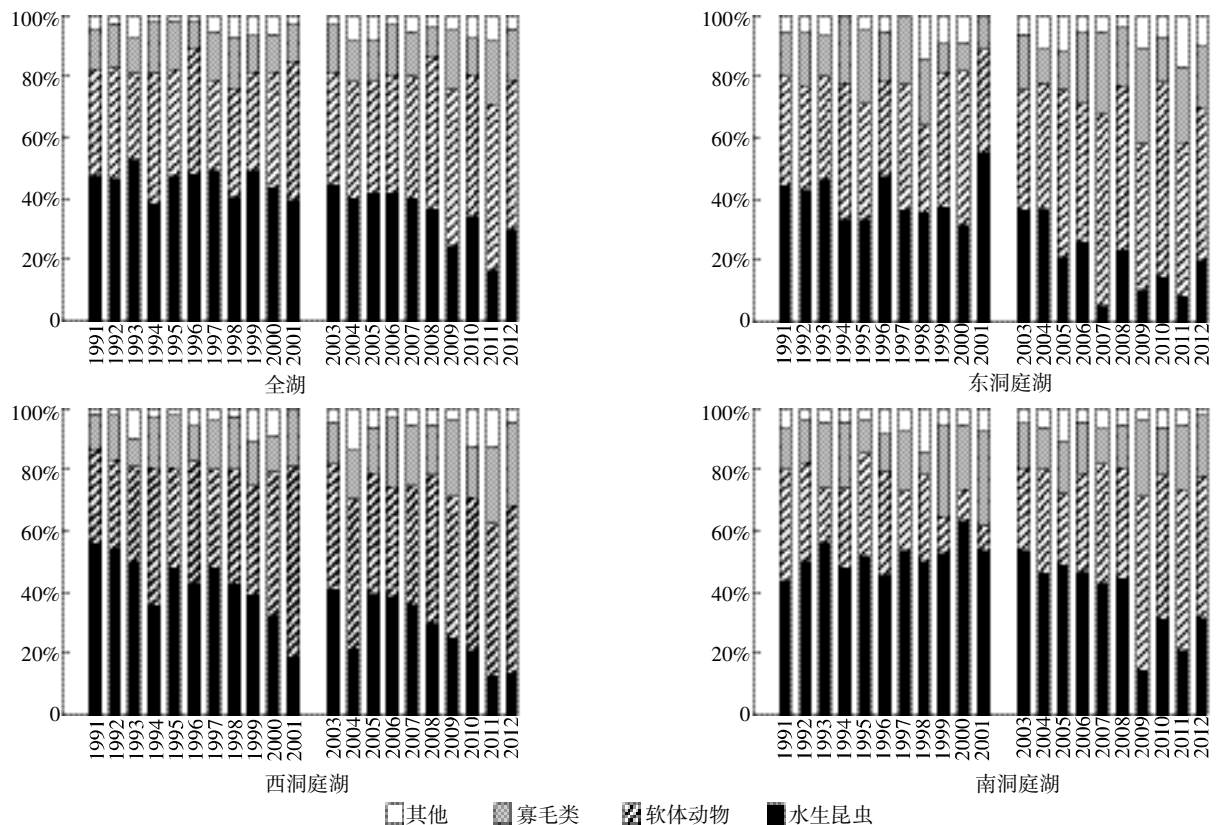


图3 洞庭湖底栖动物种类组成时空变化

Figure 3 Spatial and temporal variations of macrobenthos species in Dongting Lake

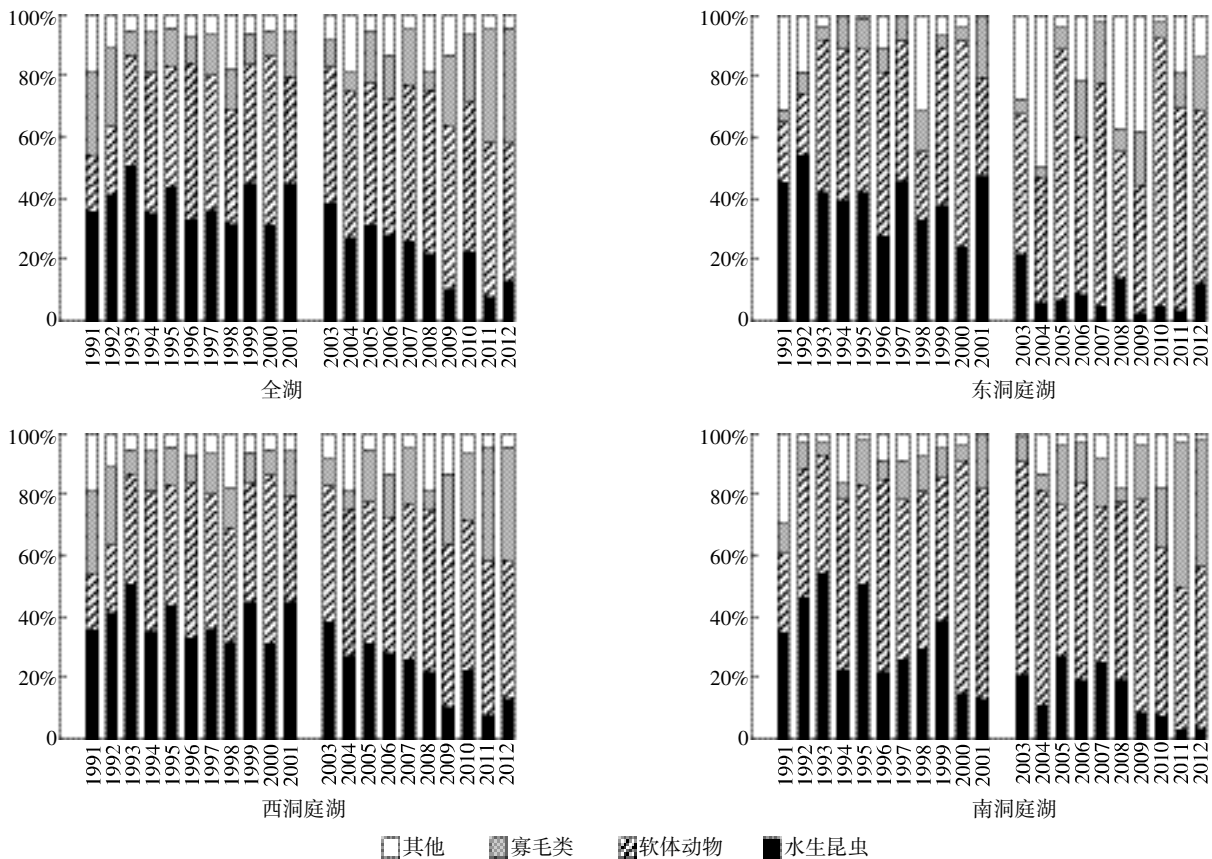


图 4 洞庭湖底栖动物组成密度时空变化

Figure 4 Spatial and temporal variations of macrobenthos density in Dongting Lake

表 1 洞庭湖底栖动物主要优势种年变化  
Table 1 Dominant species of macrobenthos in different years

| 年份   | 优势种               |
|------|-------------------|
| 1991 | 钩虾                |
| 1992 | 齿斑摇蚊、钩虾           |
| 1994 | 河蚬、蜉蝣             |
| 1996 | 河蚬、球蚬             |
| 1998 | 河蚬、钩虾             |
| 2000 | 齿斑摇蚊、河蚬           |
| 2001 | 齿斑摇蚊、河蚬           |
| 2003 | 齿斑摇蚊、河蚬           |
| 2004 | 钩虾、齿斑摇蚊、河蚬        |
| 2005 | 梨形环棱螺、齿斑摇蚊        |
| 2006 | 钩虾                |
| 2007 | 指突隐摇蚊             |
| 2008 | 铜锈环棱螺、沼螺、河蚬、钩虾    |
| 2009 | 河蚬、钩虾             |
| 2010 | 苏氏尾鳃蚓、梨形环棱螺       |
| 2011 | 河蚬、苏氏尾鳃蚓、霍甫水丝蚓    |
| 2012 | 梨形环棱螺、苏氏尾鳃蚓、霍甫水丝蚓 |

(*Gammaridae* sp.)。1991—2009 年期间各年份优势种略有差异,但其演替并不明显;至 2010—2012 年期间优势种略有变化,由水生昆虫、软体类与钩虾等为主的清洁型种类向以寡毛类、软体类等为主的清洁型与耐污型种类转变。河蚬、钩虾一般生活在轻度污染至清洁水体中,而苏氏尾鳃蚓、霍甫水丝蚓等为主要优势耐污种类的出现,表明近几年洞庭湖水体污染趋于严重。

2.1.4 群落物种多样性

如表 2 所示,东、南、西洞庭湖 Shannon-Wiener 指数( $H'$ )范围分别为 1.73~3.62、2.31~4.12、1.61~3.75,东洞庭湖  $H'$  指数明显低于西、南洞庭湖。1991—2001 年,南洞庭湖  $H'$  指数高于西洞庭湖,而之后 2003—2012 年则反之。全时段 21 年中,东洞庭湖水水质有 17 年处于轻度-中度污染水平;南洞庭湖有 13 年处于轻度-中度污染水平;西洞庭湖有 12 年处于轻度-中度污染水平。显然,东洞庭湖水水质劣于西、南洞庭湖,群落物种多样性与水质定性评价结果基本一致,能较好地指示水环境污染状况。

表 2 东、南、西洞庭湖底栖动物群落多样性指数及水质评价

Table 2 Evaluation of water quality and biodiversity index

| 年份   | 东洞庭湖 |      |    | 南洞庭湖 |      |    | 西洞庭湖 |      |    |
|------|------|------|----|------|------|----|------|------|----|
|      | H 指数 | 水质评价 |    | H 指数 | 水质评价 |    | H 指数 | 水质评价 |    |
|      |      | 生物   | 化学 |      | 生物   | 化学 |      | 生物   | 化学 |
| 1991 | 3.62 | C    | C  | 4.12 | C    | C  | 3.75 | C    | C  |
| 1992 | 3.40 | C    | C  | 3.72 | C    | C  | 3.55 | C    | C  |
| 1993 | 3.35 | C    | C  | 3.99 | C    | C  | 3.49 | C    | C  |
| 1994 | 3.25 | C    | C  | 3.45 | C    | C  | 3.40 | C    | C  |
| 1995 | 2.98 | L    | L  | 3.07 | C    | L  | 2.81 | L    | L  |
| 1996 | 2.53 | L    | L  | 2.72 | L    | L  | 2.59 | L    | L  |
| 1997 | 2.18 | L    | M  | 3.12 | C    | L  | 2.79 | L    | L  |
| 1998 | 2.01 | L    | L  | 3.11 | C    | L  | 1.96 | M    | L  |
| 1999 | 2.72 | L    | L  | 2.69 | L    | L  | 1.89 | M    | L  |
| 2000 | 2.47 | L    | M  | 2.80 | L    | L  | 2.15 | L    | L  |
| 2001 | 1.73 | M    | M  | 2.31 | L    | L  | 1.61 | M    | L  |
| 2003 | 2.56 | L    | L  | 2.77 | L    | L  | 2.98 | L    | L  |
| 2004 | 1.97 | M    | M  | 2.63 | L    | L  | 2.90 | L    | L  |
| 2005 | 2.61 | L    | L  | 2.74 | L    | M  | 3.31 | C    | M  |
| 2006 | 2.61 | L    | M  | 2.78 | L    | M  | 3.17 | C    | L  |
| 2007 | 2.41 | L    | L  | 3.10 | C    | L  | 3.22 | C    | L  |
| 2008 | 2.48 | L    | M  | 2.54 | L    | L  | 3.03 | C    | M  |
| 2009 | 2.23 | L    | M  | 2.92 | L    | L  | 2.88 | L    | L  |
| 2010 | 2.16 | L    | M  | 2.86 | L    | L  | 2.76 | L    | L  |
| 2011 | 2.05 | L    | L  | 2.35 | L    | L  | 2.34 | L    | L  |
| 2012 | 2.67 | L    | L  | 2.50 | L    | L  | 3.14 | C    | L  |

注:C 表示清洁;L 表示轻度污染;M 表示中度污染。

## 2.2 底栖动物组成与环境因子的 RDA 分析

根据影响底栖动物组成的主要环境因素<sup>[14,25]</sup>,结合洞庭湖主要环境因子,将 1991—2012 年洞庭湖水体总磷、总氮、叶绿素 a、透明度、COD<sub>Mn</sub>、DO、pH、氨氮、水温共 9 种环境因子与底栖动物群落组成作 RDA 分析。

图 5 反映了底栖动物种类数、密度与环境因子的

关系,环境因子第一、二轴间的相关系数均为 0,表明分析结果可信。RDA 模型中,物种数-环境关系解释的贡献率最大的是叶绿素(27.1%),其次是透明度(10.7%);密度-环境关系解释的贡献率最大的是叶绿素(32.3%),其次是总磷(16.6%)。底栖动物种类第一排序轴与叶绿素 a 负相关(-0.55),而与透明度正相关(0.61);底栖动物密度第一排序轴与叶绿素 a

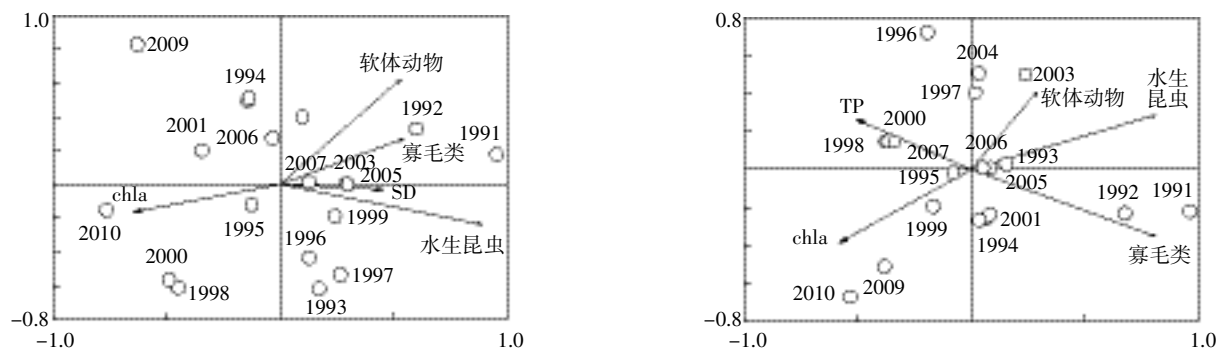


图 5 底栖动物与环境因子的排序图(左图为种类排序图,右图为密度排序图)

Figure 5 Ranking of macrobenthos and environment factors(Left for specie, right for density)

(-0.36)和总磷(-0.42)负相关。由此可知,RDA 模型中,重要的并且有显著作用的环境因子为叶绿素 a、总磷和透明度( $P<0.05$ ),其中,叶绿素 a 与洞庭湖寡毛类、水生昆虫和软体动物种类和密度分布均显著负相关,而透明度和总磷与其种类、密度分布分别显著正相关和显著负相关。RDA 模型中,所有排序轴的检验均有显著差异( $P<0.05$ ),表明RDA 排序图较好地解释了大型底栖动物与环境因子的相关关系。

3 讨论

3.1 水环境因子的影响

洞庭湖水体中总氮、总磷浓度自 20 世纪 90 年代中期以来长期维持在较高水平( $\rho_{TN}$  大于  $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\rho_{TP}$  大于  $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),为藻类的生长提供了充足的营养,浮游植物数量、叶绿素 a 浓度迅速增加,富营养进程加快<sup>[26]</sup>。高欣等<sup>[5]</sup>研究认为,水体中氮磷等营养元素的含量对底栖动物有一定的影响,正常情况下,当氮含量为  $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下时,磷的制约作用明显。洞庭湖水体总氮含量一般低于  $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ <sup>[26]</sup>,可知总磷是洞庭湖底栖动物的制约因素之一。Tokeshi M<sup>[3]</sup>研究认为,当水体中叶绿素 a 和藻类现存量剧变时,底栖动物种群结构也随之发生较大变化。蔡永久等<sup>[27]</sup>通过对长江下游湖泊大型底栖动物群落结构及多样性的研究发现,水体营养水平的增加,底栖动物群落逐渐被小个体的耐污种类所主导。本研究 RDA 分析结果显示,叶绿素 a 与水生昆虫、软体类、寡毛类种类和密度分布显著负相关,总磷与其密度分布显著负相关,表明了叶绿素 a、总磷是影响洞庭湖底栖动物群落组成的主

要因素。

RDA 分析结果同时显示,水体透明度与底栖动物种类正相关,可能与三峡工程有一定的关联。2003 年三峡蓄水运行以来,大坝拦截了长江大量泥沙,经荆江三口入洞庭湖泥沙量显著减少<sup>[17]</sup>,洞庭湖水体透明度有所增加,直接改善了水体的光照作用,有利于底栖动物生长<sup>[28]</sup>。

3.2 三峡工程的影响初探

3.2.1 三峡蓄水后洞庭湖入湖水量、泥沙、水位变化

2003—2012 年入湖总径流量 2359 亿  $\text{m}^3$ ,较蓄水前(1991—2002 年)减少 599 亿  $\text{m}^3$ ,其中,三口减少量占 32.2%,四水及区间减少量占 67.8%;洞庭湖入湖总沙量减少 6427 万 t,其中,三口入湖沙量减少 5685 万 t, 占总减少量的 88.4%(中国环境科学研究院:长江三峡水利枢纽工程竣工环境保护验收——洞庭湖专题);受长江干流河床冲刷与三峡水库下泄流量共同作用的影响,城陵矶年均水位与蓄水前相比较(表 3),年平均水位降低 0.53 m,逐月平均水位 1—4 月抬升 0.17~0.89 m,以 3 月水位抬升最为明显,5—12 月下降 0.42~1.84 m,以汛期 7 月及汛后 11 月水位下降最为明显,与三峡水库调度方式汛前消落期(3 月)、汛期(7 月)和汛后蓄水期(10—11 月)相应时间基本吻合。可见三峡蓄水对洞庭湖入湖泥沙、水位变化的影响大,而水量变化主要受四水及区间的影响。

3.2.2 水沙减少

RDA 分析显示,湖体透明度与底栖动物种类正相关,叶绿素 a 与底栖动物种类负相关。三峡蓄水后,洞庭湖入湖水沙减少,水流变缓,湖体透明度增加

表 3 三峡水库运行前后洞庭湖城陵矶逐月平均水位月均值比较(m)

Table 3 Monthly average of water level of Chenglingji in Dongting Lake before and after operation of Three Gorges Project(m)

| 研究时段      | 1 月   | 2 月   | 3 月   | 4 月   | 5 月   | 6 月   | 7 月   | 8 月   | 9 月   | 10 月  | 11 月  | 12 月  | 年均值   |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1999—2002 | 20.68 | 20.58 | 21.70 | 23.44 | 26.57 | 28.45 | 31.21 | 29.79 | 29.27 | 26.75 | 24.95 | 22.18 | 25.46 |
| 2003—2010 | 20.96 | 21.17 | 22.59 | 23.61 | 26.13 | 28.03 | 29.83 | 29.12 | 28.45 | 24.96 | 23.11 | 21.31 | 24.94 |
| 水位差       | 0.28  | 0.59  | 0.89  | 0.17  | -0.44 | -0.42 | -1.38 | -0.67 | -0.82 | -1.79 | -1.84 | -0.87 | -0.53 |

注:数据来源为长江水利委员会《三峡工程蓄水运行对长江与洞庭湖、鄱阳湖关系及湖区生态环境影响初步研究总报告》(2011 年 8 月)。

表 4 三峡水库运行前后洞庭湖同期底栖动物结构变化

Table 4 Changes of structure of benthic animals of Dongting Lake in different water level periods before and after operation of Three Gorges Project

| 指标                     | 3 月(枯水期) |       |      | 6 月(平水期) |       |       | 9 月(丰水期) |       |       |
|------------------------|----------|-------|------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|
|                        | 蓄水前      | 蓄水后   | 差值   | 蓄水前      | 蓄水后   | 差值    | 蓄水前      | 蓄水后   | 差值    |
| 种数/个                   | 35       | 25    | -10  | 29       | 33    | 4     | 26       | 27    | 1     |
| 密度/ind·m <sup>-2</sup> | 329      | 274   | -55  | 193      | 207   | 14    | 176      | 179   | 3     |
| 水位/m                   | 21.7     | 22.59 | 0.89 | 28.45    | 28.03 | -0.42 | 29.27    | 28.45 | -0.82 |

0.04~0.12 m, 浮游植物年平均密度较蓄水前增加134.6%(中国环境科学研究院:长江三峡水利枢纽工程竣工环境保护验收——洞庭湖专题)。黄代中等<sup>[26]</sup>研究发现,洞庭湖浮游植物密度与流量显著负相关,透明度与浮游植物数量、密度显著正相关,且三峡蓄水后富营养化进程明显加快,并于2008年开始出现富营养化现象。由前述文献<sup>[3, 27-28]</sup>分析可知,三峡蓄水后入湖径流量的减少,营养水平的增加,对洞庭湖底栖动物种群结构有负面影响,而湖体透明度增加有正负两方面的影响。

### 3.2.3 水位变化

Deevey<sup>[4]</sup>研究认为,湖泊底栖动物现存量一般与水深存在反向的关系。陈其羽等<sup>[29]</sup>、马徐发等<sup>[30]</sup>研究发现,武汉东湖、湖北道观河水库浅水带底栖动物较深水带有更高的多样性、现存量。谢志才等<sup>[25]</sup>研究发现,水深是影响东洞庭湖区底栖动物结构与分布的关键因子。由表4可知,三峡蓄水后,3月(枯水期)水位抬升,洞庭湖底栖动物种数、密度较蓄水前明显减少10种、55 ind·m<sup>-2</sup>,6月(平水期)、9月(丰水期)水位下降,底栖动物种数、密度略有增加。这表明三峡蓄水后枯水期水位抬升对洞庭湖底栖动物种数、密度有较明显负面影响,而丰、平水期水位下降虽有正面影响,但并不明显。

### 3.2.4 间接影响

洞庭湖湿地水生植物丰富,以芦苇、苔草、莲分布最广。蔡永久等<sup>[27]</sup>研究认为,依靠水草生存及庇护的底栖物种生境受到影响时,其密度和生物量将降低消失。三峡蓄水后,伴随着水位的降低,洞庭湖有相当部分的湿地陆地化,依靠水草生存及庇护的底栖物种生境地减少,其种数与密度相应减少。同时,三峡蓄水后,洞庭湖入湖水量减少,导致氮、磷等污染物浓度增加<sup>[21]</sup>,会间接对底栖动物产生一定的不利影响<sup>[27]</sup>。

从以上因素的初步分析,结合三峡蓄水后洞庭湖全湖、东、南、西洞庭湖底栖动物种群数量与密度在变化的时间节点与三峡水库蓄水变化过程(2003年水库蓄水位至135 m,2008年试验性蓄水至172.8 m,2010年正常蓄水位175 m)相关联(图2、图3、图4),且与蓄水前的波动状态相比整体呈明显下降趋势上来综合,三峡工程运行近期,入湖水情的变化,宏观上对洞庭湖底栖动物有一定的负面影响,与帅红<sup>[22]</sup>认为受三峡蓄水后洞庭湖水情变化的影响,洞庭湖底栖动物密度呈下降趋势的结论吻合。

当然,三峡工程运行期尚短,新的水资源平衡尚

未形成,洞庭湖底栖动物种群仍然处于动荡与恢复期,三峡工程的更具体的长期影响有待进一步深入观测与研究。

### 3.3 洞庭湖底栖动物区域差异原因

洞庭湖水系复杂,水流流场大致是长江三口、沅江、澧水汇入西洞庭,出流入南洞庭(同时接纳资江),南洞庭出流与湘江、资江合流汇合进入东洞庭,由城陵矶一口注入长江。西、南、东洞庭湖水体透明度受沿程入湖河流泥沙输入及东洞庭湖区域挖沙活动频繁的影响,东洞庭湖透明度明显低于西、南洞庭湖(中国环境科学研究院:长江三峡水利枢纽工程竣工环境保护验收——洞庭湖专题);东洞庭湖君山东北至西北部水域水流受藕池东支分流的影响大,三峡蓄水后,藕池入湖水量减少,水流变缓,尤其在9—10月,藕池河平均断流天数由1999—2002年的29 d增至2003—2011年的43 d,导致东洞庭湖除主航道外的大部分水域成为缓流区,小部分水域甚至成为静流区,利于浮游植物的大量繁殖乃至水华的发生(中国环境科学研究院:长江三峡水利枢纽工程竣工环境保护验收——洞庭湖专题);洞庭湖水体中的总氮、总磷主要来源于农业面源<sup>[31]</sup>,岳阳市毗邻东洞庭湖区,其国内生产总值及单位面积生产总值较高,相对于西、南湖区,人类活动频繁,生产生活导致大量氮、磷污染物进入东洞庭湖<sup>[32]</sup>。近20年来东洞庭湖水体营养化程度明显高于西、南洞庭湖,且近年水体出现的富营养化、水质变劣的现象<sup>[26]</sup>与上述因素有很大的关联。

东洞庭湖近年来已富营养化。王银东等<sup>[28]</sup>研究认为,水体富营养化会导致底栖动物有些种类消失而耐污种的生物量增加;尤其近20多年来,东洞庭湖采沙活动严重,调查发现在鹿角至城陵矶段平均1.5 km左右就有1艘采沙船只,其采沙活动破坏了底栖动物栖息生境,严重影响了底栖动物种群数量。这可能是东洞庭湖底栖动物种数与密度低于西、南洞庭湖的主要原因。

## 4 结论

(1)1991—2012年洞庭湖共调查到底栖动物4门7纲229属(种),全时段年均种类个数53种,以水生昆虫、软体类为主,分别占种数的41.5%、39.6%。寡毛类占13.2%,其他类占5.7%。

(2)洞庭湖种群结构组成上,全时段水生昆虫种数、密度整体呈缓慢下降趋势;软体动物密度基本平

稳,种数整体呈缓慢上升趋势。区域时空分布上,东洞庭湖底栖动物种数、密度、多样性指数均低于西、南洞庭湖。

(3)2010年以后优势种由水生昆虫、软体类与钩虾等为主的清洁型种类向以寡毛类、软体类等为主的清洁型与耐污型种类转变。Shannon-Wiener 指数( $H'$ )能较好地指示水环境污染状况。

(4)RDA 分析结果显示,洞庭湖水体总磷、叶绿素 a 和透明度是影响底栖动物种群的主要水环境因素。三峡运行后,洞庭湖入湖水沙减少、水位下降对底栖动物种群有一定的负面影响。

#### 参考文献:

- [1] Covich A P, Palmer M A, Crowl T A. The role of benthic invertebrate species in freshwater ecosystems[J]. *BioScience*, 1999, 49(2): 119-127.
- [2] Devine J A, Vanni M J. Spatial and seasonal variation in nutrient excretion by benthic invertebrates in a eutrophic reservoir[J]. *Freshwater Biology*, 2002, 47(6): 1107-1121.
- [3] Tokeshi M. Resource utilization, overlap and temporal community dynamics: A null model analysis on fan epiphytic chironomid community [J]. *Journal of Animal Ecology*, 1986, 55(2): 491-506.
- [4] Deevey Es. Limnological studies in Connecticut: VI. The quantity and composition of the bottom fauna of thirty-six Connecticut and New York lakes[J]. *Ecological Monographs*, 1941, 11(4): 413-455.
- [5] 高 欣, 牛翠娟, 胡忠军. 太湖流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(12): 3329-3336.  
GAO Xin, NIU Cui-juan, HU Zhong-jun. Macrobenthos community structure and its relations with environmental factors in Taihu River basin[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(12): 3329-3336.
- [6] 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]. *水生生物学报*, 2001, 25(3): 210-216.  
GONG Zhi-jun, XIE Ping, TANG Hui-juan, et al. The influence of eutrophication upon community structure and biodiversity of macrozoobenthos[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2001, 25(3): 210-216.
- [7] Blocksom K A, Kurtenbaeh J P, Klemm D J, et al. Development and evaluation of the lake macroinvertebrate integrity index (LMII) for New Jersey lakes and reservoirs[J]. *Environ Monit and Assess*, 2002, 77(3): 311-333.
- [8] Molina C I, Gibon F, Dupuy J, et al. Transfer of mercury and methylmercury along macroinvertebrate food chains in a floodplain lake of the Beni River, Bolivian Amazonia[J]. *Sci Total Environ*, 2010, 408(16): 3381-3391.
- [9] Gabriels W, Lock K, Pauw N D, et al. Multimetric macroinvertebrate index flanders (MMIF) for biological assessment of rivers and lakes in flanders (Belgium)[J]. *Limnol*, 2010, 40: 199-207.
- [10] 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.  
WU Zhao-shi, CAI Yong-jiu, CHEN Yu-wei, et al. Assemblage structure investigation of macrozoobenthos and water quality bioassessment of the main river systems in Taihu Basin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(5): 686-694.
- [11] 王 琴, 王海军, 崔永德. 武汉东湖水网区底栖动物群落特征及其水质的生物学评价[J]. *水生生物学报*, 2010, 34(4): 739-746.  
WANG Qin, WANG Hai-jun, CUI Yong-de. Community characteristics of the macrozoobenthos and bioassessment of water quality in lake Donghu District, Wuhan[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010, 34(4): 739-746.
- [12] 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.  
LU Qiang-guo. water quality biological evaluation by using the benthic animal community structure in Dongting Lake[J]. *Environmental Science*, 1985, 6(2): 59-63.
- [13] Ter Braak C J F, Prentic I C. A theory of gradient analysis[J]. *Adv in Ecol Res*, 1986, 18: 271-317.
- [14] 汪 星, 郑丙辉, 刘录三, 等. 洞庭湖典型断面底栖动物组成及其与环境因子的相关分析[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(12): 2237-2244.  
WANG Xing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, et al. Correlation analysis of macroinvertebrate composition and environmental factors of typical sections in Dongting[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(12): 2237-2244.
- [15] 刘录三, 郑丙辉, 李宝泉, 等. 长江口大型底栖动物群落的演变过程及原因探讨[J]. *海洋学报*, 2012, 34(3): 134-145.  
LIU Lu-san, ZHENG Bing-hui, LI Bao-quan, et al. Long-term trends of macrobenthos in Changjiang Estuary, China in relation to environmental changes[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(3): 134-145.
- [16] 王丑明, 谢志才, 宋立荣, 等. 滇池大型无脊椎动物的群落演变与成因分析[J]. *动物学研究*, 2011, 32(2): 212-221.  
WANG Chou-ming, XIE Zhi-cai, SONG Li-rong, et al. Dianchi Lake macroinvertebrate community succession trends and retrogressive analysis[J]. *Zoological Research*, 2011, 32(2): 212-221.
- [17] 张细兵, 卢金友, 王 敏, 等. 三峡工程运用后洞庭湖水沙情势变化及其影响初步分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(11): 640-643.  
ZHANG Xi-bing, LU Jin-you, WANG Min, et al. Preliminary study on flow and sediment changing and influence on Dongting Lake after the Three Gorges Project operation[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(11): 640-643.
- [18] 黄 群, 孙占东, 姜加虎. 三峡水库运行对洞庭湖水位影响分析[J]. *湖泊科学*, 2011, 23(3): 424-428.  
HUANG Qun, SUN Zhan-dong, JIANG Jia-hu. Impacts of the operation of the Three Gorges Reservoir on the lake water level of Lake Dongting[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(3): 424-428.
- [19] 卢金友, 罗恒凯. 长江与洞庭湖关系变化初步分析[J]. *人民长江*, 1999, 30(4): 24-26.  
LU Jin-you, LUO Heng-kai. Preliminary analysis on variation of the relation between Yangtze River and Dongting Lake[J]. *Yangtze River*, 1999, 30(4): 24-26.
- [20] 李景保, 常 疆, 吕殿青, 等. 三峡水库调度运行初期荆江与洞庭湖区的水文效应[J]. *地理学报*, 2009, 64(11): 1342-1352.

- LI Jing-bao, CHANG Jiang, LÜ Dian-qing, et al. The hydrological effect between Jingjiang River and Dongting Lake during initial period of The Gorges Project operation[J]. *Geographica Sinica*, 2009, 64(11): 1342-1352.
- [21] 李忠武, 赵新娜, 谢更新, 等. 三峡工程蓄水对洞庭湖水环境质量特征的影响[J]. 地理研究, 2013, 32(11): 2021-2030.
- LI Zhong-wu, ZHAO Xin-na, XIE Geng-xin, et al. Water environmental quality properties of Dongting Lake affected by construction of the Three Gorges Project[J]. *Geographical Research*, 2013, 32(11): 2021-2030.
- [22] 帅 红. 洞庭湖健康综合评价研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2012.
- SHUAI Hong. A study on the comprehensive evaluation of Dongting Lake's health[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2012.
- [23] 戴友芝, 唐受印, 张建波. 洞庭湖底栖动物种类分布及水质生物学评价[J]. 生态学报, 2000, 20(2): 277-282.
- DAI You-zhi, TANG Shou-yin, ZHANG Jian-bo. The distribution of zoobenthos species and bio-assessment of water quality in Dongting Lake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(2): 277-282.
- [24] 汪 星, 郑丙辉, 李 黎, 等. 基于底栖动物完整性指数的洞庭湖典型断面的水质评价[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(9): 1799-1807.
- WANG Xing, ZHENG Bing-hui, LI Li, et al. Bioassessment on water quality based on biotic integrity index of macroinvertebrate in representative sections of Dongting Lake, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(9): 1799-1807.
- [25] 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[J]. 湖泊科学, 2007, 19(3): 289-298.
- XIE Zhi-cai, ZHANG Jun-qian, CHEN Jing, et al. Spacial distributional pattern of macrozoobenthos and pollution evaluation in East Lake Dongting Reserve[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(3): 289-298.
- [26] 黄代中, 万 群, 李利强, 等. 洞庭湖近 20 年水质与富营养化状态变化[J]. 环境科学研究, 2013, 26(1): 27-33.
- HUANG Dai-zhong, WAN Qun, LI Li-qiang, et al. Changes of water quality and eutrophic state in recent 20 years of Dongting Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(1): 27-33.
- [27] 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.
- CAI Yong-jiu, GONG Zhi-jun, QIN Bo-qiang. Community structure and diversity of macrozoobenthos in Lake Taihu, a large shallow eutrophic lake in China[J]. *Biodiversity Science*, 2010, 18(1): 50-59.
- [28] 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[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2005, 24(3): 253-257.
- WANG Yin-dong, XIONG Bang-xi, CHEN Cai-bao, et al. The effect of environment factors on life activity of zoobenthos[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University*, 2005, 24(3): 253-257.
- [29] 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.
- CHEN Qi-yu, LIANG Yan-ling, WU Tian-hui. Studies on community structure and dynamics of zoobenthos in lake Donghu, Wuhan[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1980, 7(1): 41-56.
- [30] 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.
- MA Xu-fa, XIONG Bang-xi, WANG Ming-xue, et al. The community structure and biodiversity of macrozoobenthos in Daoguanhe Reservoir, Hubei Province[J]. *Journal of Lake Science*, 2004, 16(1): 49-55.
- [31] 秦迪岚, 黄 哲, 罗岳平, 等. 洞庭湖区污染控制区划与控制对策[J]. 环境科学研究, 2011, 24(7): 748-755.
- QIN Di-lan, HUANG Zhe, LUO Yue-ping, et al. Pollution control regionalization and countermeasures in Dongting Lake Area[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(7): 748-755.
- [32] 王 伟, 卢少勇, 金相灿, 等. 洞庭湖沉积物及上覆水体氮的空间分布[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(增刊2): 6-10.
- WANG Wei, LU Shao-yong, JIN Xiang-can, et al. Spatial distribution research of nitrogen in sediments and the overlying water of lake Dongtinghu [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(Suppl2): 6-10.