

## 典型城市湖泊五里湖底栖动物群落演变特征及其生态修复应用建议\*

薛庆举, 汤祥明, 龚志军, 高 光, 蔡永久\*\*

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

**摘 要:** 底栖动物作为湖泊生态修复中常用的淡水生物类群, 对维持和稳定湖泊生态系统结构与功能具有重要作用, 探明底栖动物群落演变特征对湖泊生态修复实践具有重要的指导意义. 本研究于 2007—2017 年对太湖五里湖底栖动物群落结构开展了 11 年的长期调查, 结合底栖动物历史数据以及水体、沉积物和浮游植物等相关资料的分析, 探讨了五里湖底栖动物群落结构演变特征及潜在的影响因素. 在综合分析底栖动物及环境因子变化特征的基础上, 结合五里湖开发与修复工程的特点和发生时间, 发现五里湖底栖动物群落演变过程总体可划分为自然演变、快速退化、生境修复和缓慢恢复 4 个阶段. 在自然演变阶段, 生境特征为底栖动物群落演变的直接影响因素, 如水深、溶解氧和底质类型等; 在快速退化阶段, 人类活动干扰(如围湖造田)剧烈成为此阶段底栖动物群落演变的主要影响因素; 在生境修复阶段, 五里湖内开展的综合整治(包括生态清淤、污水截流、退渔还湖、动力换水、生态修复、湖岸整治和环湖林带建设等工程)等各项生态修复工程成为群落演变的主要影响因素, 但在此阶段底栖动物优势种仍为耐污种; 自 2014 年以来进入缓慢恢复期, 软体动物投放成为底栖动物群落演变的一个重要影响因素, 铜锈环棱螺等软体动物成为优势种. 综合以上分析结果及底栖动物在生态修复中的应用实践, 今后应加强对底栖动物生态修复投放过程及之后的维护管理等方面的研究.

**关键词:** 底栖动物; 群落演变; Shannon-Wiener 指数; 优势度; 影响因子; 生态修复; 五里湖

## Succession of macrozoobenthic communities and implications for ecological restoration in an urban Lake Wuli, Jiangsu Province\*

XUE Qingju, TANG Xiangming, GONG Zhijun, GAO Guang & CAI Yongjiu\*\*

(State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

**Abstract:** Zoobenthos play crucial roles in maintaining and stabilizing the structure and function of lake ecosystem. Moreover, various zoobenthic species are valuable in freshwater eco-restoration. Uncovering the succession of zoobenthic community evolution could provide important information for the application of zoobenthic species in freshwater eco-restoration. In the present study, succession of macrozoobenthic communities was examined by combing field investigation from 2007 to 2017 and various documents. It was found that the succession of zoobenthos community in Lake Wuli can be divided into four stages, including natural succession stage, rapid degradation stage, habitat restoration stage and slow recovery stage. Besides, taking the water quality, sediment characteristics, phytoplankton community, and the reported eco-restoration activities in Lake Wuli into consideration, we discussed the major impact factors in different succession stages of zoobenthos community. Summarily, based on the above results and practical application of zoobenthos in freshwater eco-restoration, the present study pointed out the research directions which should be enhanced at last.

**Keywords:** Zoobenthos; community succession; Shannon-Wiener index; dominance index; impact factor; ecological restoration; Lake Wuli

\* 2019-06-17 收稿; 2019-08-20 收修改稿.

国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07203-004)、国家自然科学基金项目(31670466)和中国科学院南京地理与湖泊研究所引进人才启动项目(NIGLAS2017QD10)联合资助.

\*\* 通信作者; E-mail: caiyj@niglas.ac.cn.

底栖动物作为水生生态系统中的分解者或消费者,对维持水生生态系统的稳定和健康发展具有重要作用<sup>[1-2]</sup>。底栖动物中的一些物种不仅能够产生一定的经济效益,还可以被用来指示水体的污染状况<sup>[3]</sup>,其中大型底栖动物的物种多样性水平就常与水体的污染状况关系密切<sup>[4]</sup>。此外,大量研究表明,底栖动物中的一些大型滤食性软体动物具有极强的滤食能力,可通过滤食作用明显降低水体中浮游植物、有机碎屑和无机颗粒等物质的含量,从而提高水体透明度,改善水质<sup>[5-7]</sup>。滤食性软体动物亦被应用到太湖五里湖的生态修复中,对水体透明度的提升和氮、磷等营养物质含量的降低起到了良好效果<sup>[8]</sup>。

五里湖,又称蠡湖,与太湖北部梅梁湾相连,面积约 8.6 km<sup>2</sup>,东西长约 6 km,南北宽为 0.3~1.2 km,湖岸线长约 21 km<sup>[9]</sup>,是我国城市浅水湖泊生态修复治理的典型代表。1950s 时,该湖基本处于原始状态,湖水清澈见底,湖内水草丰茂。但自 1950s 末期以来,受围垦、养殖、建闸等人类活动影响,湖泊生态系统受到严重破坏,至 1990s 初,湖内大型水生植物及大型底栖动物基本消失<sup>[10-12]</sup>。为了恢复五里湖生态系统健康,从 1980s 末期开始对五里湖进行局部修复,到 2000 年时开始进行污染源控制,再到 2002 年开展综合整治工程<sup>[13]</sup>,这一系列的生态修复措施使湖内水质得到明显改善,湖泊生态系统功能也得到一定程度的恢复<sup>[14-15]</sup>。自 2006 年开始,五里湖内开始投放螺、蚌、蚬等大型软体动物用于湖体生态修复。然而,关于近几十年来五里湖内底栖动物群落演变特征及其对环境治理与恢复过程的响应尚无研究。

本文以 2007—2017 年五里湖底栖动物季度调查数据为基础,结合文献资料,探讨了五里湖底栖动物群落的演变规律。同时,搜集了近几十年来水质、沉积物及浮游植物等相关历史资料,综合考虑五里湖内开展的重要生态修复工程,分析了五里湖底栖动物群落演变特征的主要影响因素。最后,针对底栖动物在水体生态修复中的应用现状,结合五里湖底栖动物生态修复应用情况,提出了底栖动物在生态修复应用中的几点建议,以期在五里湖及类似城市湖泊生态修复中底栖动物应用及相关研究提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 数据获取

文中所用数据主要包括 1950 年以来五里湖水体理化参数、浮游植物密度与优势种、沉积物理化参数以及底栖动物密度、生物量与优势种数据。其中,水体理化数据来自文献<sup>[9, 11, 15-22]</sup>,浮游植物密度与生物量数据来自文献<sup>[11]</sup>,沉积物理化数据来自文献<sup>[11, 16, 19, 22-24]</sup>,2007 年之前的底栖动物数据来自文献<sup>[11, 19, 25]</sup>。此外,浮游植物 2008—2013 年数据以及部分底栖动物数据来自中国科学院太湖湖泊生态系统研究站,2007—2017 年底栖动物数据来自本文作者对五里湖的长期季度监测,在五里湖布设了两个长期监测点(图 1)。以上所有年度数据均为该指标当年的年平均值。

本研究中使用 1/40 m<sup>2</sup>改良版彼得森采泥器采集底栖动物样品,每个点位采集 3 次,样品的采集、前处

理及种类鉴定的详细方法参考文献<sup>[26]</sup>,水质类别标准参照我国《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)。

### 1.2 环境因子测定方法

本研究涉及的主要环境因子包括高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、总氮(TN)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、硝态氮(NO<sub>3</sub>-N)、总磷(TP)、正磷酸盐(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)、叶绿素 *a*(Chl *a*)、溶解氧(DO)和透明度(SD)等水体理化参数以及浮游植物群落相关参数。其中,DO 和 SD 分别使用 YSI 6600 V2 和塞氏盘现场测定,其他水体理化参数的检测均参考水质分析标准方法<sup>[27]</sup>,浮游植物相关生物参数的测定参考文献<sup>[28]</sup>。

### 1.3 五里湖生态修复历程简介

近几十年来,五里湖开发及生态修复主要事件如表 1 所示。五里湖人类开发活动自 1950s 末期开始,至

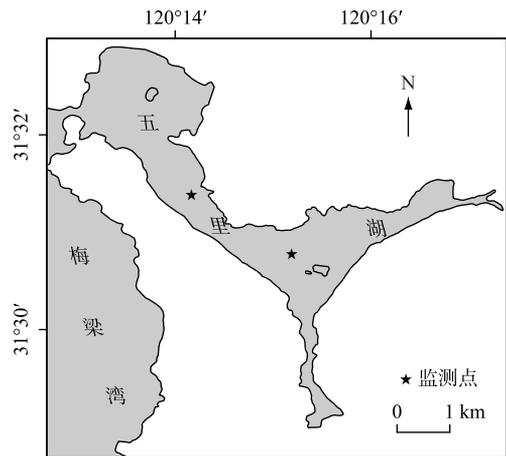


图 1 五里湖底栖动物长期监测点位分布

Fig.1 The regular sampling sites of zoobenthos in Lake Wuli

2003年,围湖造田、围地养鱼和水产养殖已成为五里湖水体的第二大污染源.五里湖生态修复过程从1980s末开始,修复措施主要包括局部修复、污染源控制和综合整治.其中,局部修复主要为小范围水生植物种植,综合整治中生态修复工程主要为对五里湖水生植物系统的重建,在修复过程中开展保水渔业项目,投放软体动物和鱼类,并建立示范区.

表1 五里湖开发及生态修复重点项目简介

Tab.1 The major programs applied in Lake Wuli in recent decade

项目类型	时间	内容	参考文献
养殖	1960s 后期开始	全湖放养草鱼	[11]
局部修复	1980s 末—1990s 中期	种植水生植物,共进行3次局部修复	[13,20]
养殖	1990s	全湖放养鲢鳙鱼,统一经营	[14]
污染源控制	2000 年开始	太湖流域“零点”行动为起点,主要为控制直接入湖的生活和工业污染	[13]
综合整治	2002 年开始	生态清淤、污水截流、退渔还湖、动力换水、生态修复、湖岸整治和环湖林带建设6大工程	[15,19,22-23,29-31]

## 1.4 数据分析

1.4.1 Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener 生物多样性指数( $H'$ )通过以下公式进行计算<sup>[32]</sup>:

$$H' = - \sum_{i=1}^S \left( \frac{n_i}{N} \right) \ln \left( \frac{n_i}{N} \right) \quad (1)$$

式中,  $n_i$  为第  $i$  种底栖动物的密度,  $N$  为该点位样本中底栖动物总密度. 关于底栖动物多样性的评价标准可参考文献[33].

1.4.2 物种优势度 底栖动物物种优势度通过以下公式进行计算<sup>[34]</sup>:

$$Y = \left( \frac{n_i}{N} \right) f_i \quad (2)$$

式中,  $n_i$  为第  $i$  种底栖动物的密度,  $N$  为该点位样本中底栖动物总密度,  $f_i$  为该物种在各点位出现的频率,物种优势度  $Y > 0.02$  的物种为优势种.

1.4.3 统计分析 文中使用 IBM SPSS 24.0 对底栖动物和环境因子数据进行 Spearman 等级相关分析. 此外,文中点位图的绘制由 ArcGIS 10.2 完成,而其他图的绘制均由软件 Origin 2016 完成.

## 2 结果分析

### 2.1 水质变化特征

1950年以来五里湖水体理化特征变化显著(图2), $COD_{Mn}$ 浓度的变化可分为以下几个阶段:第1阶段,1950s—1980s,浓度均值仅为2.53 mg/L,可达Ⅰ类或Ⅱ类水标准;第2阶段,1990s初期,此时 $COD_{Mn}$ 浓度急剧上升,均值可达24.83 mg/L,峰值为57 mg/L,水质均处于Ⅴ类或劣Ⅴ类标准;第3阶段,1990s末期至今,此阶段 $COD_{Mn}$ 浓度整体呈降低趋势,其平均值为6.45 mg/L,水质基本处于Ⅳ类及以上标准,2012年时可达Ⅱ类水. 相关分析结果显示, $COD_{Mn}$ 浓度与TN浓度呈显著正相关( $P < 0.05$ ).

五里湖水体中TN、 $NH_3-N$ 和 $NO_3^-N$ 浓度的变化趋势相似且互相之间呈显著正相关( $P < 0.05$ ). 已有数据显示,TN浓度在1980s初期仍处于较低水平,在1980—1981年时,浓度仍仅为0.85 mg/L,可达Ⅱ类水标准;而在1987—2008年期间,各年TN浓度均已超过2 mg/L,均值为5.64 mg/L,在1994年达到最大值10.92 mg/L,并分别在2002年和2005年达到阶段性峰值;2008年之后,TN浓度出现明显下降,均值为1.37 mg/L,水质为Ⅳ类水标准,但在2017—2018年时浓度再次升高为2.65 mg/L.  $NH_3-N$ 和 $NO_3^-N$ 浓度均在2002年达到最大值,分别为5.08和1.21 mg/L. 其中, $NH_3-N$ 浓度在1950s和1980—1991年期间分别可达Ⅰ类和Ⅱ类水标准;在1992—2002年期间,均值高达3.49 mg/L,大部分时间为劣Ⅴ类水;2007年开始, $NH_3-N$ 浓度大幅度下降,至2014年期间,均值仅为0.24 mg/L,水质可达Ⅰ类和Ⅱ类水标准,但在2017—2018年时又出现较

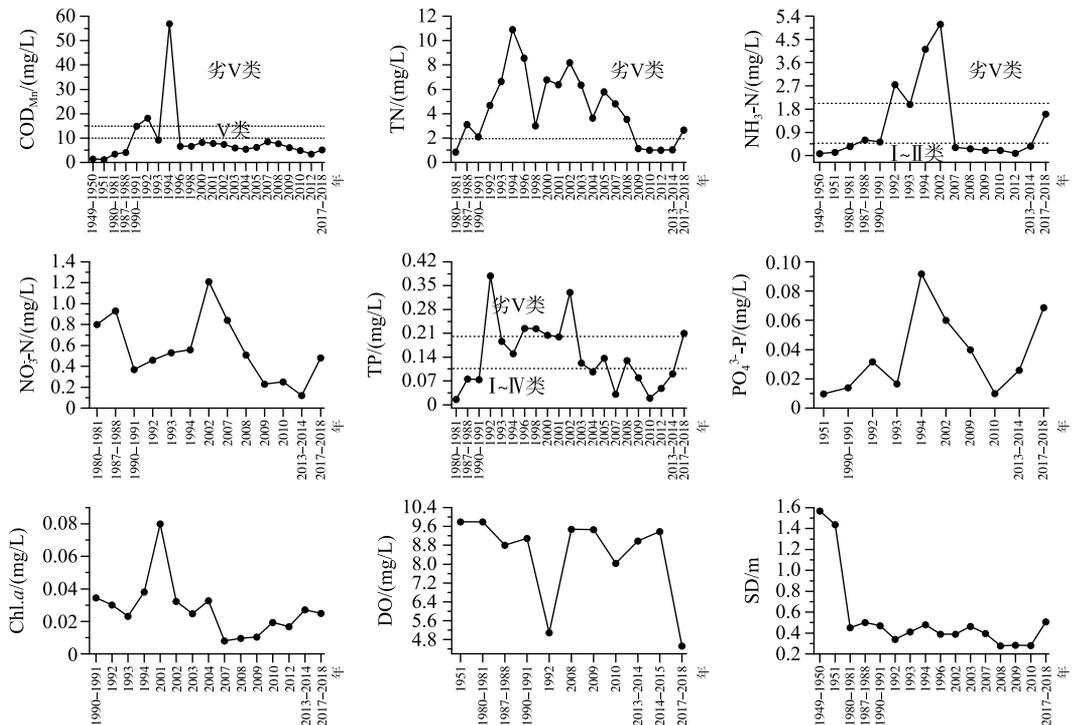


图 2 1950 年以来五里湖水质指标的变化

Fig.2 Variation of different water physico-chemical parameters in Lake Wuli since 1950

大幅度的升高。NO<sub>3</sub>-N 浓度在 1980s 时要高于 NH<sub>3</sub>-N 的浓度,此外,与 TN 和 NH<sub>3</sub>-N 浓度的变化趋势略有不同,在 1990s 期间,NO<sub>3</sub>-N 浓度出现明显下降;NO<sub>3</sub>-N 浓度在 2002 年达到最大值之后呈不断下降趋势,但其在 2017—2018 年时同样出现较大幅度的升高。

五里湖水体中 TP 浓度在 1981 年时仅为 0.02 mg/L,可达 II 类水标准,之后开始升高,并在 1992 年达到最大值 0.38 mg/L,此后直到 2002 年,其浓度一直处于较高水平,水质在大部分时间亦处在劣 V 类标准。在 2002 年之后,五里湖水体 TP 浓度明显降低,2002—2014 年期间平均值为 0.08 mg/L,可达 IV 类水标准,在某些年份已达到 II 类,甚至 I 类水平。同样地,TP 和 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 浓度在 2017—2018 年均出现了较为明显的上升。在 1951 年时,PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 浓度仅为 0.01 mg/L,在 1994 年时达到最大值 0.09 mg/L,之后不断降低,但在 2013—2014 年之后再次出现上升趋势,在 2017—2018 年时已达到 0.07 mg/L。

从整体上看,Chl.a 浓度自 1990 年以来呈波动下降趋势,其在 2001 年出现最大值 0.08 mg/L,在 1993、2003 和 2007 年时分别出现阶段性谷值,自 2007 年降至最小值 0.008 mg/L 后,近几年来呈不断上升趋势。除在 1992 年和 2017—2018 年时出现极低值,DO 浓度在其他年份均处于较高值 (> 8 mg/L),但从整体上看,水体中 DO 浓度存在下降趋势。在 1950s 时,水体 SD > 1.4 m,自 1980 年开始,SD 值降至 0.5 m 以下,特别是在 2008—2010 年期间,SD 值仅为 0.28 m,在 2017—2018 年时恢复至 0.51 m。

综上所述,除 DO 浓度和 SD 外,五里湖水体各水质指标之间存在相似的变化规律,相关性分析结果也印证了这一点(表 2)。各指标均在 1980s—1990s 期间开始显著升高,大部分在 1994 年或 2002 年时达到最大值,在 2007 年附近降至最低值。此外,大部分水质指标均在 2017—2018 年出现一定程度的升高。在水质较差的时期,COD<sub>Mn</sub>、TN、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 均达到劣 V 类,而在 2007 年之后水质情况得到一定程度的缓解。

## 2.2 沉积物理化性质变化特征

五里湖沉积物中 N 含量在 2002 和 2013 年时处于峰值,以 2013 年时为最高,而在 2001 和 2012 年时处于谷值,以 2012 年时为最低。沉积物中 P 含量先增加后降低,其中以 2002 年时为最高,1950s 时最低,且在

表 2 Spearman 相关性分析结果

Tab.2 The results of Spearman correlation analysis

	COD <sub>Mn</sub>	TN	NH <sub>3</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	TP	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	Chl.a	DO	SD
COD <sub>Mn</sub>	1								
TN	0.627 *	1							
NH <sub>3</sub> -N	0.483	0.673 *	1						
NO <sub>3</sub> -N	0.024	0.783 *	0.500	1					
TP	0.518	0.503	0.721 *	0.133	1				
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	0.100	0.714	0.429	0.657	0.486	1			
Chl.a	-0.050	0.224	0.700 *	-0.048	0.661 *	0.200	1		
DO	0.086	-0.036	-0.679	-0.107	-0.286	-0.300	-0.714	1	
SD	-0.367	0.233	0.548	0.452	0.083	0.900 *	0.333	-0.714	1

\* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$ .

表 3 五里湖沉积物理化性质的变化

Tab.3 Variation of physico-chemical parameters in sediment of Lake Wuli

时间	N/(mg/g)	P/(mg/g)	TOC/(mg/g)
1950s	—	0.023	7.5
1990—1991 年	1.81	0.71	25.1
2001 年	1.19	2.61	40.4
2002 年	2.25	2.80	40.7
2003 年	1.48	0.75	27.0
2012 年	1.16	0.59	19.6
2013 年	2.31	0.54	—
2015 年	1.42	0.56	17.5

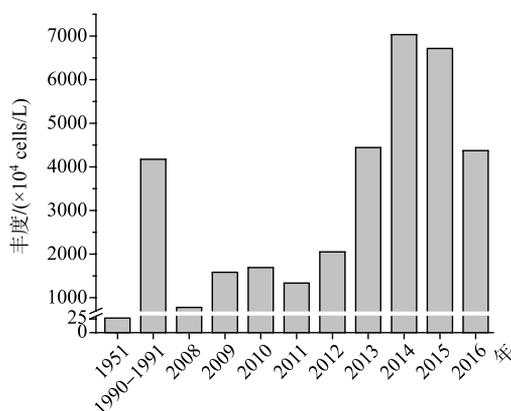


图 3 近几十年来五里湖浮游植物丰度变化  
Fig.3 Variation of phytoplankton abundance of Lake Wuli in recent decades

2001—2002 年时高于沉积物中的 N 含量. 沉积物中 TOC 含量的变化趋势与 P 含量变化趋势基本一致, 同样在 2002 年时达到最大值. 虽然 2015 年时沉积物中 P 和 TOC 含量相对 2002 年时明显降低, 亦低于 1990—1991 年时的含量, 但仍远高于 1950s 时的水平(表 3).

### 2.3 浮游植物群落变化特征

在 1951 年时, 五里湖水体中浮游植物密度仍处于较低水平, 仅为  $2.67 \times 10^5$  cells/L, 但在 1990—1991 年时, 浮游植物密度已增加至  $4.17 \times 10^7$  cells/L(图 3). 在 2008—2012 年期间, 浮游植物密度出现一定程度的下降, 平均为  $1.49 \times 10^7$  cells/L. 在 2014 年时, 浮游植物密度达到近几年的最大值  $7.03 \times 10^7$  cells/L. 自 1951 年以来, 五里湖浮游植物优势种也发生了变化. 在 1951 年时, 五里湖浮游植物以硅藻门和隐藻门种类占优势. 到 1990—1991 年时, 浮游植物以蓝藻门和绿藻门种类为主, 其中又以色球藻属(*Chroococcus*)、微囊藻属(*Microcystis*)和栅列藻属(*Scenedesmus*)占优势, 开始出现较为严重的蓝藻水华. 在 2008 年之后, 浮游植物又以隐藻门、绿藻门和蓝藻门种类占优势, 但在夏季时, 仍以蓝藻门的颤藻属(*Oscillatoria*)、束丝藻属(*Aphanizomenon*)和鱼腥藻属(*Anabaena*)种类为主要优势种.

### 2.4 底栖动物群落变化特征

近几十年来, 五里湖底栖动物密度变化情况可分成 4 个阶段. 在 1987—1992 年期间, 底栖动物密度较低, 平均仅为  $789$  ind./m<sup>2</sup>, 在 1995 年时达到阶段密度峰值  $3860$  ind./m<sup>2</sup>. 在 2006 年时, 底栖动物密度降至  $1008$  ind./m<sup>2</sup>, 并在 2007 年升至阶段峰值  $2295$  ind./m<sup>2</sup>, 2009 年时再次降至谷值  $1059$  ind./m<sup>2</sup>. 2010—2013

年期间, 底栖动物密度均较高, 平均为  $3151$  ind./m<sup>2</sup>, 在 2013 年时达到最大值  $3920$  ind./m<sup>2</sup>. 2014—2017 年期间, 五里湖底栖动物密度一直较低, 平均仅为  $844$  ind./m<sup>2</sup>, 期间在 2015 年时密度略高, 在 2017 年时达到密

度最小值 460 ind./m<sup>2</sup>(图 4)。

2002 年时,五里湖底栖动物生物量较高,为 26.75 g/m<sup>2</sup><sup>[19]</sup>,之后显著下降,并在 2008 年达到生物量最小值 2.32 g/m<sup>2</sup>。在 2008—2013 年期间,底栖动物生物量先升高后降低,平均仅为 6.97 g/m<sup>2</sup>,在 2012 年时达到峰值 14.69 g/m<sup>2</sup>。2014 年时,底栖动物生物量突然升高,达到最大值 258.3 g/m<sup>2</sup>,之后开始下降,但仍处于较高值(图 4)。相关性分析结果显示,五里湖底栖动物生物量与 Chl.a 浓度和浮游植物丰度均呈显著正相关,相关系数均为 0.83。

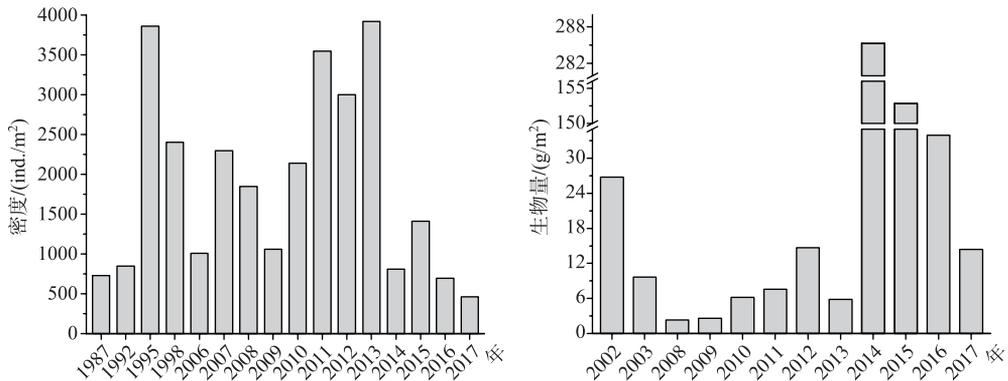


图 4 近几十年来五里湖底栖动物密度及生物量变化

Fig.4 Variation of zoobenthos density and biomass of Lake Wuli in recent decades

关于 20 世纪五里湖中底栖动物物种数量的历史资料很少,但可以发现,1950s 时,五里湖内底栖动物物种十分丰富,仅水生昆虫就有数百种,底栖动物物种多样性亦极高,但自 1960s 开始,底栖动物物种数量大量减少<sup>[11]</sup>。从图 5 中可以看出,在 2007—2013 年时,底栖动物物种数量在大部分年份仅为个位数,且多样性处于较低水平。2014 年开始,底栖动物物种数量有明显的升高,在 2015 年时达到近几年的最大值 19 种,但 Shannon-Wiener 多样性指数在 2016 年时达到最大值。从整体上看,近 10 年来五里湖底栖动物生物多样性在大部分年份处于一般水平(1~2),在少部分年份处于较差水平。

在 1950s 年时,五里湖内大型底栖动物众多,优势种密度以日本沼虾(*Macrobrachium nipponensis*)为最高,其次为大型软体动物。但从 1960s 开始,大型底栖动物基本消失,到 1990s 时,富营养化水体耐污种寡毛类和摇蚊幼虫等已成为五里湖的优势种<sup>[11]</sup>。在之后的近 20 年的时间里,五里湖底栖动物在大部分年份均以霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)优势度为最高,少数年份以中国长足摇蚊(*Tanytus chinensis*)优势度最高。在 2007—2013 年和 2017 年期间,五里湖内底栖动物优势种均为霍甫水丝蚓和摇蚊幼虫,但在 2014—2016 年期间,几种大型腹足类软体动物和扁舌蛭(*Glossiphonia complanata*)亦成为优势种,特别是铜锈环棱螺(*Bellamyia aeruginosa*)开始出现,并在 3 年中均为优势种(表 4)。

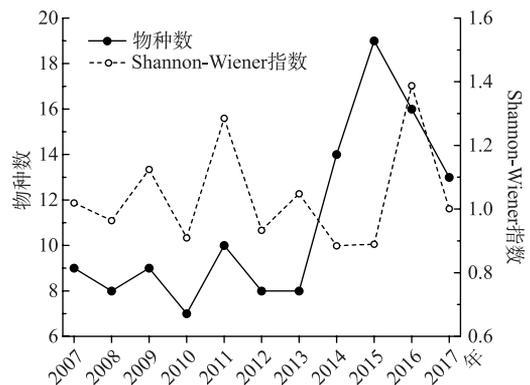


图 5 近 10 年来五里湖底栖动物物种数及 Shannon-Wiener 多样性指数

Fig.5 Changes in species richness and Shannon-Wiener index of macrozoobenthos in Lake Wuli in recent decade

表 4 五里湖底栖动物优势种变化  
Tab.4 Changes in dominant species of zoobenthos in Lake Wuli

年份	优势种(优势度)
2007	霍甫水丝蚓(0.39)、中国长足摇蚊(0.14)、红裸须摇蚊(0.11)、多巴小摇蚊(0.03)、花翅前突摇蚊(0.02)
2008	霍甫水丝蚓(0.36)、中国长足摇蚊(0.23)、红裸须摇蚊(0.06)、花翅前突摇蚊(0.06)
2009	霍甫水丝蚓(0.28)、中国长足摇蚊(0.16)、多巴小摇蚊(0.12)、花翅前突摇蚊(0.09)、红裸须摇蚊(0.06)
2010	霍甫水丝蚓(0.23)、中国长足摇蚊(0.13)、红裸须摇蚊(0.11)、多巴小摇蚊(0.06)、花翅前突摇蚊(0.05)
2011	中国长足摇蚊(0.41)、霍甫水丝蚓(0.20)、多巴小摇蚊(0.09)、花翅前突摇蚊(0.07)、红裸须摇蚊(0.05)
2012	霍甫水丝蚓(0.25)、红裸须摇蚊(0.23)、中国长足摇蚊(0.16)、花翅前突摇蚊(0.04)、多巴小摇蚊(0.03)
2013	霍甫水丝蚓(0.64)、中国长足摇蚊(0.24)、红裸须摇蚊(0.03)
2014	中国长足摇蚊(0.38)、红裸须摇蚊(0.06)、长角涵螺(0.05)、铜锈环棱螺(0.02)、花翅前突摇蚊(0.02)
2015	霍甫水丝蚓(0.20)、花翅前突摇蚊(0.15)、中国长足摇蚊(0.06)、扁舌蛭(0.04)、铜锈环棱螺(0.03)
2016	霍甫水丝蚓(0.18)、扁舌蛭(0.07)、花翅前突摇蚊(0.07)、红裸须摇蚊(0.05)、中国长足摇蚊(0.04)、铜锈环棱螺(0.02)
2017	中国长足摇蚊(0.08)、霍甫水丝蚓(0.06)、多巴小摇蚊(0.05)、花翅前突摇蚊(0.05)、红裸须摇蚊(0.03)、摇蚊属一种(0.03)

### 3 讨论

#### 3.1 五里湖底栖动物群落演变特征

作为典型的城市浅水湖泊,五里湖底栖动物群落近 70 年来的变化与城市发展进程密切相关. 随着人类活动的加剧以及城市化进程的加快,五里湖底栖动物物种数在 1960s 时便开始出现下降,到 1990s 时大型底栖动物已基本消失<sup>[11]</sup>,在 21 世纪初期物种数已降至个位数. 同时,底栖动物群落的优势种也发生了极大的变化,由日本沼虾和大型软体动物<sup>[12]</sup>变为耐污性强的寡毛类和摇蚊幼虫等物种. 在经过近 20 年的生态修复之后,五里湖底栖动物物种数量在 2014 年开始小幅升高,铜锈环棱螺等近 10 种软体动物和日本沼虾亦开始出现,但生物量和密度仍处于较低水平.

通过对五里湖 1950 年以来底栖动物群落结构数据的分析,并结合五里湖开发与生态修复重要时间节点,可以将五里湖底栖动物群落演变过程分为数个阶段. 第 1 个阶段为 1960s 初期以前,此阶段为人为干扰相对较少的自然演变阶段. 虽然关于 1950 年以前五里湖底栖动物群落结构的调查资料很少,但从文献<sup>[11-12]</sup>中对五里湖 1960s 初期以前底栖动物群落结构的记录可以看出,1960s 初期以前,五里湖基本处于自然状态,底栖动物群落物种多样性程度极高,大型底栖动物物种丰富,优势种以日本沼虾和软体动物为主. 第 2 阶段为 1960s 末期到 1980s 末期,此阶段为剧烈负面人为干扰参与底栖动物群落快速退化阶段. 在此期间,围湖造田活动活跃,加之 1960s 末期开始全湖放养草鱼,并进行围地养殖,水质条件恶化,底栖动物生境遭到严重破坏,大型软体动物基本消失,耐污种开始成为优势种<sup>[11,22]</sup>. 第 3 阶段为 1990s 初期到 21 世纪初期,此阶段已开始对五里湖生态系统进行生态修复,但仍以寡毛类和摇蚊幼虫等耐污种为优势种. 在此期间,五里湖生态修复经历了局部修复、污染源控制、综合整治等数个阶段<sup>[13,20]</sup>,但其中生态清淤等措施对底栖动物群落破坏性较大,且短期内不利于大型底栖动物物种的生存,而生态修复中投放的软体动物成活率亦较低<sup>[22]</sup>,所以,此阶段五里湖底栖动物群落生物多样性仍处于较低水平,优势种仍为耐污种. 第 4 阶段为 2014 年之后的底栖动物群落缓慢恢复期. 在此阶段,五里湖生态修复工程初见成效,水质和其他生境条件得到一定程度的改善<sup>[15,22,35]</sup>,底栖动物生物多样性存在一定的转好趋势,几种大型软体动物物种已成为常见种,并在某些年份中占优势.

#### 3.2 群落演变影响因素分析

通过以上对五里湖底栖动物群落演变过程的分析可以发现,在不同演变阶段,底栖动物群落结构特征形成的主要影响因素存在明显不同. 在自然演变过程中,影响底栖动物群落演变的主要因素均与生境条件密切相关,主要包括水深、溶解氧、底质类型等<sup>[36-38]</sup>. 在本研究中,虽然大部分水质与沉积物指标(除 Chl.a 之外)与底栖动物密度和生物量均不存在显著的相关关系,但各指标的恶化与加重亦伴随着底栖动物耐污种

优势的形成。

当人为产生的负面干扰增多之后,人类活动成为影响五里湖底栖动物群落结构的主要因素,人类活动主要包括围湖造田、围地养殖、污水排入等。人类活动的加剧,导致五里湖内底栖动物赖以生存的适宜生境被破坏,水体富营养化,蓝藻水华频发,使五里湖一度成为太湖水体富营养化最严重的水域<sup>[10]</sup>。而水体富营养化则会导致大型底栖动物物种多样性降低,使寡毛类和摇蚊幼虫等耐污种成为绝对优势种<sup>[4]</sup>。在本研究中,我们亦发现底栖动物生物量与 Chl.a 浓度和浮游植物丰度呈显著正相关关系,这也说明藻类的大量繁殖会导致五里湖内底栖动物耐污种优势度的明显增加。同时,五里湖水体富营养过程亦伴随着沉积物中营养物质和有机碳含量的增加,这也从另一方面导致底栖动物耐污种优势的形成。

自 1990s 初期开始,五里湖进入生态修复阶段,生态修复措施成为影响底栖动物群落演变的主要因素。五里湖生态修复措施主要包括污水截流、退渔还湖、生态清淤、动力换水、水生植被恢复等<sup>[13]</sup>,各项措施均有利于底栖动物生境条件如水质、底质以及沉水植物覆盖度等的改善<sup>[22,39-40]</sup>。然而,其中的部分措施亦会对底栖动物群落结构产生较为严重的破坏,如在生态清淤之后底栖动物物种密度和生物量均会明显下降<sup>[19]</sup>。另外,在 21 世纪初开始向五里湖内投放螺、蚌等大型软体动物用于湖体的生态修复<sup>[8,22]</sup>,这也对五里湖内的底栖动物群落产生了较大影响。在投放初期,湖内底栖动物生物量和密度显著升高,但在之后的调查中发现,前期投放的大量底栖动物几乎全部死亡<sup>[22]</sup>。本研究分析结果亦发现,投放之后五里湖内底栖动物群落物种数和生物量短期内均显著升高,物种数的上升同时伴随着生物多样性指数的升高,而数年之后(2014 年)物种数、生物多样性指数和生物量均出现一定程度的升高,密度则下降,说明生物投放及其他生态修复手段对五里湖底栖动物群落产生了有益的影响。

### 3.3 底栖动物群落修复及其应用研究展望

由于底栖动物群落结构组成与其生境状况密切相关,生境的变化会显著影响其群落组成。另外,大量研究表明,一些大型软体动物物种可通过其摄食控制水体中着生藻类(螺类)和悬浮颗粒物(蚌类)浓度,结合水生植被修复可强化对特定水体水质的修复效果<sup>[5-6]</sup>,所以,底栖动物投放已普遍应用于国内外水生态修复。基于本论文和相关研究,提出以下建议:1)进一步加强底栖动物群落原始数据的累积,并增加数据的广度(覆盖不同生境,并增加数据采集频率);2)加强对数据的分析,筛选影响底栖动物群落组成的关键因子,并结合室内模拟实验,探索底栖动物群落演变机制;3)底栖动物在生态修复中的应用应更多地关注投放过程和投放后的长效管理,比如投放前,应充分调查投放区生境现状,对不良生境应进行适度改善,如沉水植物种植、底质改良等,待投放区生境稳定后再行投放;投放过程中,应根据投放目的和投放生物的生活史特点,选取适宜的投放物种、个体大小<sup>[6]</sup>、投放时间、投放区域以及投放方式等<sup>[41]</sup>。

## 4 参考文献

- [1] Gong ZJ, Xie P, Yan YJ. Theories and methods of studies on the secondary production of zoobenthos. *J Lake Sci*, 2001, **13**(1): 79-88. DOI: 10.18307/2001.0112. [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.]
- [2] Xue QJ, Su XM, Xie LQ. Advances on cyanotoxin toxicology of zoobenthos. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(14): 4570-4578. DOI: 10.5846/stxb201308262157. [薛庆举, 苏小妹, 谢丽强. 蓝藻毒素对底栖动物的毒理学研究进展. 生态学报, 2015, **35**(14): 4570-4578.]
- [3] Lakew A, Moog O. A multimetric index based on benthic macroinvertebrates for assessing the ecological status of streams and Rivers in central and southeast Highlands of Ethiopia. *Hydrobiologia*, 2015, **751**(1): 229-242. DOI: 10.1007/s10750-015-2189-1.
- [4] Gong ZJ, Xie P, Tang HJ et al. The influence of eutrophication upon community structure and biodiversity of macrozoobenthos. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2001, **25**(3): 210-216. [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): 210-216.]
- [5] Ismail NS, Dodd H, Sassoubre LM et al. Improvement of urban lake water quality by removal of *Escherichia coli* through the action of the bivalve *Anodonta californiensis*. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(3): 1664-1672. DOI: 10.1021/es5033212.
- [6] Wu ZK, Qiu XC, Zhang XF et al. Effects of *Anodonta woodiana* on water quality improvement in restoration of eutrophic

- shallow lakes. *J Lake Sci*, 2018, **30**(6): 1610-1615. DOI: 10.18307/2018.0612. [吴中奎, 邱小常, 张修峰等. 富营养化浅水湖泊生态修复中背角无齿蚌 (*Anodonta woodiana*) 对水质改善的影响. 湖泊科学, 2018, **30**(6): 1610-1615.]
- [ 7 ] Chen YX, Lu XM, He Y *et al.* Research progress of benthic mollusks for water environmental ecological restoration. *Water Purification Technology*, 2010, **29**(1): 5-8. [陈玉霞, 卢晓明, 何岩等. 底栖软体动物水环境生态修复研究进展. 净水技术, 2010, **29**(1): 5-8.]
- [ 8 ] Meng SL, Chen JZ, Hu GD *et al.* Preliminary study on eco-restoration effect of releasing suspension-feeding animal on west Wuli Lake. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, **25**(16): 225-230. [孟顺龙, 陈家长, 胡庚东等. 滤食性动物放流对西五里湖的生态修复作用初探. 中国农学通报, 2009, **25**(16): 225-230.]
- [ 9 ] Wang JL, Fu ZS, Qiao HX *et al.* Assessment of eutrophication and water quality in the estuarine area of Lake Wuli, Lake Taihu, China. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 1392-1402. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.137.
- [10] Zhou YF, Zhou Y, You Y. Community structure and factors affecting periphytic algae on an artificial substrate in Wuli lake. *Journal of Hydroecology*, 2017, **38**(2): 57-64. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2017.02.009. [周彦锋, 周游, 尤洋. 五里湖人工基质上着生藻类群落结构及其影响因子研究. 水生态学杂志, 2017, **38**(2): 57-64.]
- [11] Li WC. Biological and environmental succession in Wuli Bay of Taihu Lake along with the eutrophication processes. *J Lake Sci*, 1996, **8**(S1): 37-45. DOI: 10.18307/1996.sup06. [李文朝. 五里湖富营养化过程中水生生物及生态环境的演变. 湖泊科学, 1996, **8**(S1): 37-45.]
- [12] Wu XW. Limnology investigation of Wuli Lake in 1951. *Hydrobiology Collection*, 1962, (1): 63-113. [伍献文. 五里湖1951年湖泊学调查. 水生生物学集刊, 1962, (1): 63-113.]
- [13] Jiang WL, Wu HS, Bian B. Inspiration for "12th five-year" from governance experiences of water environment governance in Wuli lake. *Environmental Science and Technology*, 2011, **24**(2): 62-64, 69. [姜伟立, 吴海锁, 边博. 五里湖水环境治理经验对“十二五”治理的启示. 环境科技, 2011, **24**(2): 62-64, 69.]
- [14] Xu WD, Mao XW, Wu DH *et al.* Analysis and evaluation of ecological restoration effects in Wuli Lake of Lake Taihu. *Water Resources Development Research*, 2012, **12**(8): 60-63. [徐卫东, 毛新伟, 吴东浩等. 太湖五里湖水生态修复效果分析评估. 水利发展研究, 2012, **12**(8): 60-63.]
- [15] Zhuang Y, Tang XJ, Sheng Y *et al.* The study on water environmental improvement of Lihu lake for 10 years comprehensive treatment projects. *Arid Environmental Monitoring*, 2014, **28**(2): 49-54. [庄严, 汤小健, 盛翼等. 蠡湖综合整治十年来水环境变化的研究. 干旱环境监测, 2014, **28**(2): 49-54.]
- [16] Li WC, Yang QX, Zhou WP. Studies on eutrophication of Wuli lake and possible restoration strategies. *J Lake Sci*, 1994, **6**(2): 136-143. DOI: 10.18307/1994.0206. [李文朝, 杨清心, 周万平. 五里湖营养状况及治理对策探讨. 湖泊科学, 1994, **6**(2): 136-143.]
- [17] Yan CZ, Xu QJ, Zhao JZ *et al.* Study on the key factors and countermeasures of eco-reconstruction in Lake Wuli. *Research of Environmental Sciences*, 2004, **17**(3): 44-47. [颜昌宙, 许秋瑾, 赵景柱等. 五里湖生态重建影响因素及其对策探讨. 环境科学研究, 2004, **17**(3): 44-47.]
- [18] Gu G, Lu GF. On the integrated control of water environment of Wuli Lake, Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2004, **16**(1): 56-60. DOI: 10.18307/2004.0108. [顾岗, 陆根法. 太湖五里湖水环境综合整治的设想. 湖泊科学, 2004, **16**(1): 56-60.]
- [19] Shen YL. Preliminary analysis on Wulihu dredging effect for Lake Taihu. *Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering*, 2005, **24**(2): 23-25, 38. [沈亦龙. 太湖五里湖清淤效果初步分析. 水利水电工程设计, 2005, **24**(2): 23-25, 38.]
- [20] Zhu X, Zhang YW. Control of water pollution in Wuli Lake. *Water Resources Protection*, 2009, **25**(1): 86-89. [朱喜, 张扬文. 五里湖水污染治理现状及继续治理对策. 水资源保护, 2009, **25**(1): 86-89.]
- [21] Bai X, Chen KN, Huang W *et al.* Current status and variation tendency of water quality in Wuli Lake, Jiangsu Province. *Water Resources Protection*, 2010, **26**(5): 6-10. [柏祥, 陈开宁, 黄蔚等. 五里湖水水质现状与变化趋势. 水资源保护, 2010, **26**(5): 6-10.]
- [22] Jiang X, Wang SH, Yang XF *et al.* Change in water quality and ecosystem of Lihu Lake before and after comprehensive water environmental improvement measures. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(6): 595-601. [姜霞, 王书航, 杨小飞等. 蠡湖水环境综合整治工程实施前后水质及水生态差异. 环境科学研究, 2014, **27**(6): 595-601.]
- [23] Chen KN, Zou J, Chen XF *et al.* Lake Ecological Restoration in Wuli Lake. *Modern Urban Research*, 2005, (5): 47-52. [陈开宁, 邹晶, 陈晓峰等. 五里湖富营养水体生态重建试验. 现代城市研究, 2005, (5): 47-52.]
- [24] Wang WW, Wang SH, Jiang X *et al.* Occurrence characteristics and release potential of nitrogen fractions in sediment of

- Lihu Lake. *China Environmental Science*, 2017, **37**(1): 292-301. [王雯雯, 王书航, 姜霞等. 蠡湖沉积物不同形态氮赋存特征及其释放潜力. 中国环境科学, 2017, **37**(1): 292-301.]
- [25] Fan CX. Historical evolution of water ecological setting in Taihu Lake. *J Lake Sci*, 1996, **8**(4): 297-304. DOI: 10.18307/1996.0402. [范成新. 太湖水体生态环境历史演变. 湖泊科学, 1996, **8**(4): 297-304.]
- [26] Cai YJ, Liu JS, Dai XL *et al.* Community structure of macrozoobenthos and bioassessment of water quality in Lake Changdang, Jiangsu Province. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(5): 1224-1232. [蔡永久, 刘劲松, 戴小琳等. 长荡湖大型底栖动物群落结构及水质生物学评价. 生态学杂志, 2014, **33**(5): 1224-1232.]
- [27] Jin XC, Tu QY eds. The standard methods for observation and analysis in lake eutrophication. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1990. [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.]
- [28] Niu Y, Shen H, Chen J *et al.* Phytoplankton community succession shaping bacterioplankton community composition in Lake Taihu, China. *Water Research*, 2011, **45**(14): 4169-4182. DOI: 10.1016/j.watres.2011.05.022.
- [29] Wang D, Kong FX, Liu AJ *et al.* Analysis of the influence of the ecological dredging to ecosystem of Lake Wuli, Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2005, **17**(3): 263-268. DOI: 10.18307/2005.0312. [王栋, 孔繁翔, 刘爱菊等. 生态疏浚对太湖五里湖湖区生态环境的影响. 湖泊科学, 2005, **17**(3): 263-268.]
- [30] Chen KN, Zhou WP, Bao CH *et al.* Response of phytoplankton to ecological restoration in eutrophic lakes: an experimental large enclosure in Wuli Lake, Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2007, **19**(4): 359-366. DOI: 10.18307/2007.0402. [陈开宁, 周万平, 鲍传和等. 浮游植物对湖泊水体生态重建的响应——以太湖五里湖大型围隔示范工程为例. 湖泊科学, 2007, **19**(4): 359-366.]
- [31] Chen KN, Bao XM, Shi LX *et al.* Ecological restoration engineering in Lake Wuli, Lake Taihu: A large enclosure experiment. *J Lake Sci*, 2006, **18**(2): 139-149. DOI: 10.18307/2006.0207. [陈开宁, 包先明, 史龙新等. 太湖五里湖生态重建示范工程——大型围隔试验. 湖泊科学, 2006, **18**(2): 139-149.]
- [32] Shannon CE, Weaver W. The mathematical theory of communication. *Bell Labs Technical Journal*, 1950, **26**(3): 321-321.
- [33] Hui XM, Wang AH, Li C *et al.* Diversity of macroinvertebrate and water quality bio-assessment in Qin River of Shanxi. *Journal of Shanxi University: Natural Science Edition*, 2019, **42**(1): 253-264. [惠晓梅, 王爱花, 李超等. 沁河山西段大型底栖动物多样性及水质生物评价. 山西大学学报: 自然科学版, 2019, **42**(1): 253-264.]
- [34] Peng SY, Li XZ, Xu Y *et al.* Variation of macrobenthos in Yellow Sea in past 10 years. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, **48**(3): 536-542. DOI: 10.11693/hyhz20160900200. [彭松耀, 李新正, 徐勇等. 十年间黄海大型底栖动物优势种的变化. 海洋与湖沼, 2017, **48**(3): 536-542.]
- [35] Li L. Practice and effect of ecosystem restoration in Lihu Lake. *Jiangsu Water Resources*, 2015, (9): 37-39. [李玲. 蠡湖水生态系统修复的实践与效果. 江苏水利, 2015, (9): 37-39.]
- [36] Cai YJ. Ecological studies of macrozoobenthos in eutrophic shallow lakes of the middle and lower reaches of the Yangtze River [Dissertation]. Nanjing: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, 2011. [蔡永久. 长江中下游浅水湖泊富营养化过程中大型底栖动物生态学研究 [学位论文]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2011.]
- [37] White MS, Xenopoulos MA, Hogsden K *et al.* Natural lake level fluctuation and associated concordance with water quality and aquatic communities within small lakes of the Laurentian Great Lakes region. *Hydrobiologia*, 2008, **613**(1): 21-31. DOI: 10.1007/s10750-008-9469-y.
- [38] Han J, Zhang ZN, Yu ZS. Macrobenthic community structure in the southern and central Bohai Sea, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(3): 531-537. [韩洁, 张志南, 于子山. 渤海中、南部大型底栖动物的群落结构. 生态学报, 2004, **24**(3): 531-537.]
- [39] Cai LL, Zhu GW, Wang YP *et al.* Influences of comprehensive treatment on water quality in Wuli Bay of Taihu Lake. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2011, **39**(5): 482-488. [蔡琳琳, 朱广伟, 王永平等. 五里湖综合整治对湖水水质的影响. 河海大学学报: 自然科学版, 2011, **39**(5): 482-488.]
- [40] Zhang M, Yu JL, He H *et al.* Effects of ecological restoration on water quality of Wuli Bay, Lake Taihu. *Ecological Science*, 2012, **31**(3): 240-244. [章铭, 于谨磊, 何虎等. 太湖五里湖生态修复示范区水质改善效果分析. 生态科学, 2012, **31**(3): 240-244.]
- [41] Chen YQ, Shi LY, Quan WM. Evaluation of zoobenthos community enhancement by artificial releasing (ecological restoration) in Changjiang river mouth. *Fishery Modernization*, 2007, **34**(2): 35-39. [陈亚瞿, 施利燕, 全为民. 长江口生态修复工程底栖动物群落的增殖放流及效果评估. 渔业现代化, 2007, **34**(2): 35-39.]