

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.03.019

# 里下河地区典型湖泊大型底栖动物与环境因子的相关性分析

朱苏葛<sup>1,2</sup>, 刘凌<sup>1</sup>, 罗娟<sup>1,2</sup>, 杨艳青<sup>1</sup>, 燕文明<sup>1</sup>

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210098;  
2. 长江水利委员会长江科学院, 湖北武汉 430010)

**摘要:**为揭示里下河地区湖泊大型底栖动物群落现状及其主要的环境影响因子,于2013年4月对里下河地区4个典型浅水湖泊的大型底栖动物群落进行了调查,并测定分析相关水质环境因子;对大型底栖动物群落与环境因子进行冗余分析,找出了对大型底栖动物群落影响较大的环境因子。结果表明:研究区域湖泊均处于富营养化状态,大型底栖动物群落分布趋向于单一化,铜锈环棱螺和霍甫水丝蚓是该地区典型湖泊的主要优势物种。冗余分析排序中,排序轴前两轴特征值较大,为0.168和0.115,合计0.283,分别解释了42.6%和31.8%的物种-环境变异,PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P、Chl-a和DO是对大型底栖动物密度影响较大的环境因子。

**关键词:**大型底栖动物;浅水湖泊;环境因子;冗余分析;里下河地区

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2016)03-0099-06

## Correlation analysis between macrozoobenthos and environmental factors in lakes of Lixia River Area

ZHU Suge<sup>1,2</sup>, LIU Ling<sup>1</sup>, LUO Juan<sup>1,2</sup>, YANG Yanqing<sup>1</sup>, YAN Wenming<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** To explore the current situation of the macrozoobenthic communities and related environmental factors in lakes of the Lixia River Area, investigations on the macrozoobenthic communities in four classic shallow lakes were carried out in April 2013, and the related environmental factors were measured and analyzed. The redundancy analysis was conducted between the macrozoobenthic communities and environmental factors to find out the environmental factors which had more influence on the macrozoobenthic communities. Results show that lakes in the area are in eutrophication state, the distribution of macrozoobenthic community trends to be simplified, *Bellamyia aeruginosa* and *Limnodrilus hoffmeisteri* are dominant species in the area. In the sort of redundancy analysis, the eigenvalues of the first two axes are larger, which are 0.168 and 0.115, summing to 0.283, and they explain 42.6% and 31.8% of the species-environment variation. PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P, Chl-a, and DO were the main environmental factors influencing the density of macrozoobenthic.

**Key words:** macrozoobenthic; shallow lake; environmental factor; redundancy analysis; Lixia River Area

里下河地区是江苏省的主要粮食生产基地,随着社会、经济的迅速发展,里下河湿地受人类活动干

扰愈来愈强烈,对该地区湖泊的调查、治理工作显得尤为重要。有学者对里下河地区湿地资源利用进行

基金项目:国家自然科学基金(51279060,41301531);江苏省水利科技项目(2012023)

作者简介:朱苏葛(1991—),男,硕士研究生,研究方向为水生态环境保护与修复。E-mail:339122341@qq.com

通信作者:刘凌,教授。E-mail:lingliu\_hhu@hhu.edu.cn

了研究<sup>[1-2]</sup>,但关于里下河地区人类活动对水生态环境干扰方面的研究较少,里下河地区湖泊底栖生物群落结构及其对环境胁迫响应关系方面的研究尚未见报道。大型底栖动物在湖泊生态系统的物质循环和能量流动中起着重要作用,如加速水底碎屑的分解、促进水体自净等<sup>[3]</sup>。大型底栖动物对环境变化较为敏感,由于其生活史较长,活动范围小,所以大型底栖动物群落结构、优势种类和多样性指数等生物参数对环境状况有很好的指示作用<sup>[4]</sup>。

底栖动物对湖泊营养水平的响应效应受到许多研究人员的关注。龚志军等<sup>[5]</sup>对武汉东湖营养水平不同的4个湖区的底栖动物群落与生物多样性进行了研究,发现水体富营养化导致底栖动物多样性水平明显降低。蔡永久等<sup>[6]</sup>对长江中下游地区4类不同营养水平湖泊的大型底栖动物群落结构和多样性进行了研究,结果表明随着水体营养水平的提高,底栖动物群落逐渐被耐污种类所主导。熊金林等<sup>[7]</sup>对4个污染程度不同的湖泊的底栖动物群落结构进行了研究,发现随着污染程度的加剧,底栖动物结构的丰富性明显降低,尤其是软体动物受到较为明显的影响。

本研究以淮河流域里下河腹部地区小型富营养化湖泊群中大纵湖、得胜湖、蜈蚣湖、九龙口为研究对象,于2013年4月进行大型底栖动物的采样调查,对大型底栖动物群落组成、优势物种进行调查,利用冗余分析法<sup>[8]</sup>对大型底栖动物与环境因子的相关关系进行了研究,旨在为里下河地区湖泊水质生物监测和评价提供科学依据,并为未来水生态环境保护提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 样品采集与测定

选取大纵湖、得胜湖、蜈蚣湖、九龙口作为研究对象,研究区域位于湖泊密集的里下河腹部地区(图1),不同湖泊的地理位置、自然环境各不相同,研究区域特征见表1。

根据湖泊面积大小均匀布设样点,其中大纵湖布设9个采样点,点位记为1~9,其余3个湖泊分别各布设3个采样点,蜈蚣湖为点位10~12、得胜湖为13~15、九龙口为16~18。

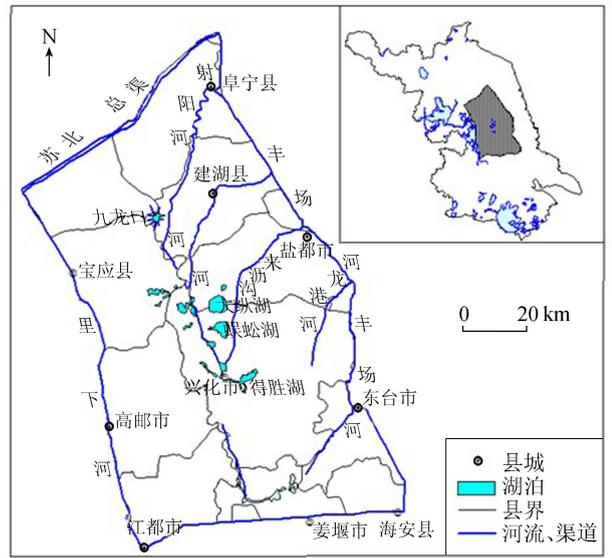


图1 里下河地区范围及研究区域示意图

用1/16 m<sup>2</sup>改良 Peterson 采泥器,在每个采样点采集3次。后将所得的泥样混合,置于60目尼龙筛中,迅速将沉积物冲洗干净,剩余物置于白瓷盘中将底栖动物活体逐一挑出,并保存于80%的乙醇溶液中,在实验室中对样品进行种类鉴定,鉴定到尽可能低的分类单元,然后计算单位面积的生物密度。

透明度 SD 用赛氏盘测定;pH 值、盐度、DO、Chl-a 在各采样点用 YSI-6600V2 型多参数水质监测仪进行现场测定;COD<sub>Mn</sub> 的测定方法参照《水和废水监测分析方法》<sup>[9]</sup>;氮磷营养盐指标用微量流动式注射分析仪 (Skalar-SA1000) 测定;底质粒径采用全自动激光粒度分析仪 (LS13320) 进行测量;沉积物粒度实测数据采用伍登-温特华斯 (Udden-Wentworth) 的粒度分级方案进行分析,并依据福克 (Folk) 分类方法对研究区域沉积物粒度进行分类命名<sup>[10]</sup>。在进行多元统计分析过程中,底质粒径以哑变量的形式进入排序。

### 1.2 分析数据处理

#### 1.2.1 富营养化指数

采用修正的营养状态指数<sup>[11]</sup>来进行里下河腹部地区各典型湖泊水体富营养化的评价:

$$I_{TSl}(\text{Chl-a}) = 10 \left( 2.46 + \frac{\ln p(\text{Chl-a})}{\ln 2.5} \right) \quad (1)$$

$$I_{TSl}(\text{SD}) = 10 \left( 2.46 + \frac{3.69 - 1.53 \ln C_{SD}}{\ln 2.5} \right) \quad (2)$$

表1 研究区域特征

湖名	地理位置	平均水深/m	水域面积/km <sup>2</sup>	湖泊特征
大纵湖	119°43'11"E ~ 119°50'34"E, 33°7'54"N ~ 33°13'36"N	1.02	27.0	以养殖为主,春夏水生植物茂盛
得胜湖	119°54'36"E ~ 119°57'28"E, 32°55'40"N ~ 32°58'13"N	1.37	15.0	以养殖为主,水体富营养化程度高,水生植物稀少
蜈蚣湖	119°54'36"E ~ 119°57'28"E, 32°55'40"N ~ 32°58'13"N	2.00	12.9	以养殖为主,水体流动性差,水质恶化
九龙口	119°35'40"E ~ 119°35'53"E, 33°23'53"N ~ 33°24'09"N	1.75	9.0	原始湖荡型湿地,河湖交错,淡水水生动植物资源丰富

$$I_{TSl}(TP) = 10 \left( 2.46 + \frac{6.71 + 1.15 \ln \rho(TP)}{\ln 2.5} \right) \quad (3)$$

式中： $\rho$ (Chl-a)为藻类质量浓度； $C_{SD}$ 为水体透明度值； $\rho$ (TP)为总磷质量浓度； $I_{TSl}$ (Chl-a)为藻类营养状态指数； $I_{TSl}$ (SD)为透明度营养状态指数； $I_{TSl}$ (TP)为总磷营养状态指数。本文所采用的  $I_{TSl}$  为三者的平均值。

### 1.2.2 相对重要性指数

采用相对重要性指数<sup>[12]</sup>确定各个湖泊的优势种,该指数的计算将每种生物的个体质量、丰度及出现频率均考虑在内,能够较为全面地反映出每种生物在整个群落中的地位,其计算公式为

$$I_{IRI} = (W + N) F \quad (4)$$

式中： $I_{IRI}$ 为相对重要性指数； $W$ 为某一类生物量占各采样点大型底栖动物总生物量的百分比； $N$ 为该种类的密度占各采样点总密度的百分比； $F$ 为该种类在各采样点出现的相对频率。

### 1.2.3 多元统计分析

利用 CANOCO4.5 软件进行多元相关分析,主要采用的是非约束线性模型的主成分分析(principal component analysis, PCA)和约束线性模型的冗余分析(redundancy analysis, RDA)。在进行生物数据(生物密度和生物参数)与环境因子多元相关分析前,首先要对生物数据进行非约束排序,排序结果显示 4 个排序轴均小于 3,选用线性模型比较合理<sup>[8]</sup>,因此在约束排序中选用冗余分析。

对生物密度进行冗余分析时去除在 18 个采样点中只出现 1 次的物种数据,以减小误差,并对余下的生物密度数据进行对数转换。生物密度数据在排序前进行中心化,进行冗余分析时,对生物密度数据又做了误差方差标准化处理,在这种情况下, CANOCO4.5 软件会单独计算每个物种的多少方差能够被环境变量所解释,误差方差的倒数被当作物种的权重。这样,物种被环境因子所解释的越多,该物

种在最终的分析中的权重也越大<sup>[13]</sup>。冗余分析中环境变量的筛选采用向前引入法( $\alpha=0.05$ ),基于蒙特卡洛置换检验约束模型的显著性( $n=9999$ )。

## 2 结果分析

### 2.1 理化指标

对各湖环境因子进行主成分分析结果,见图 2。主成分分析的前两轴的方差解释率为 67.52%,第一主成分轴主要反映了湖泊的营养盐水平,DO、pH 和  $COD_{Mn}$  与氮磷营养盐浓度呈显著负相关关系。第二主成分轴主要反映了水体和沉积物的有机质含量, $COD_{Mn}$  和 Chl-a 在第二轴上得分较高。从图 2 中可看出,同一湖泊不同区域环境因子水平较为接近,不同湖泊环境因子水平差异显著。

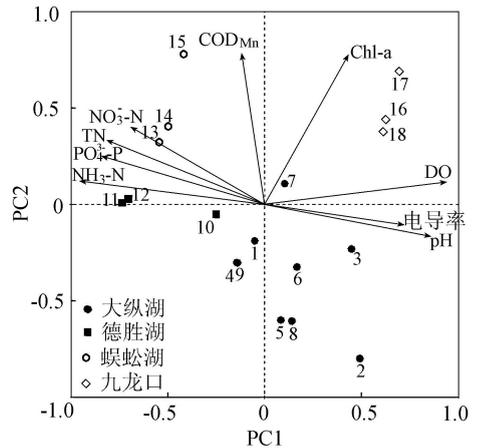


图 2 研究区域环境因子主成分分析

表 2 为环境因子的统计分析。由于各区域采样数量差别较大,故采用 Kruskal-Wallis 非参数检验比较各湖泊理化指标的差异程度。除了  $COD_{Mn}$  外,其余指标在研究区域均差异显著( $P<0.05$ ),其中 pH、 $NO_3^-$ -N、Chl-a 和  $PO_4^{3-}$ -P 差异尤为显著( $P<0.01$ )。4 个湖泊的  $I_{TSl}$  指数都较高,均处于富营养化状态。

表 2 研究区域水体环境因子特征及 Kruskal-Wallis 非参数检验结果

湖名及 检验结果	pH 值	$\rho$ (DO)/ ( $mg \cdot L^{-1}$ )	SD 值/m	盐度/ $10^{-3}$	$\rho$ ( $PO_4^{3-}$ -P)/ ( $mg \cdot L^{-1}$ )	$\rho$ (TN)/ ( $mg \cdot L^{-1}$ )
大纵湖	8.50±0.26	11.18±1.37	0.25±0.83	0.26±0.04	0.067±0.02	2.48±0.46
得胜湖	7.81±0.091	8.64±1.047	0.30±0.17	0.21±0.034	0.13±0.03	2.95±0.29
蜈蚣湖	8.06±0.07	9.95±0.24	0.63±0.29	0.21±0.0058	0.11±0.029	3.61±0.30
九龙口	8.64±0.18	14.47±2.27	0.28±0.29	0.31±0.017	0.063±0.0058	2.09±0.23
<i>P</i>	0.007	0.012	0.151	0.018	0.007	0.016
湖名及 检验结果	$\rho$ ( $NH_3$ -N)/ ( $mg \cdot L^{-1}$ )	$\rho$ ( $NO_3^-$ -N)/ ( $mg \cdot L^{-1}$ )	$\rho$ (Chl-a)/ ( $\mu g \cdot L^{-1}$ )	$\rho$ ( $COD_{Mn}$ )/ ( $mg \cdot L^{-1}$ )	$I_{TSl}$	中值粒径/ $\mu m$
大纵湖	1.26±0.53	0.29±0.090	8.03±2.84	6.12±0.73	56.59±3.68	30.90±9.49
得胜湖	2.21±0.54	0.59±0.038	10.97±1.07	5.81±0.70	61.38±0.70	18.37±7.97
蜈蚣湖	2.12±0.14	0.84±0.35	19.49±5.90	6.11±0.42	62.73±2.94	17.14±1.72
九龙口	0.60±0.22	0.25±0.069	38.47±13.67	8.83±0.44	66.94±2.31	62.17±32.98
<i>P</i>	0.011	0.008	0.005	0.059	0.016	0.037

## 2.2 底栖动物组成和相对重要性指数

大纵湖、得胜湖、蜈蚣湖、九龙口 4 个湖泊的 18 个采样点采集到的底栖动物共有 3 门 6 纲 11 目 15 科 32 属 35 种,其中寡毛类 2 种,软体动物双壳类 7 种,腹足类 6 种,摇蚊科幼虫 13 种,水蛭类 3 种,其他底栖动物 4 种。

研究区生物类群密度比例见图 3。由图 3 可知,各主要生物类群在不同湖泊的密度比例相差较大,其中,大纵湖各生物类群密度分布较为均匀,蜈蚣湖和九龙口则以某一类群占据绝对优势。

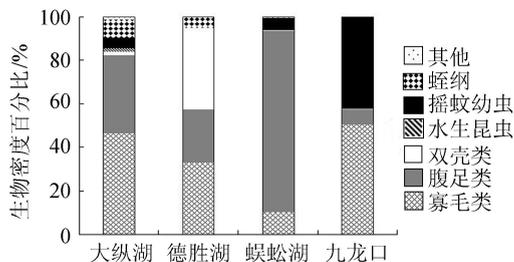


图 3 研究区域底栖动物主要类群总密度比例

计算研究区域的各物种的相对重要性指数  $I_{IRI}$ , 为方便起见,所有数据皆乘以  $10^3$ , 可得大纵湖相对重要性指数较高的前两位为铜锈环棱螺和长角涵螺,  $I_{IRI}$  分别为 218.24 和 106.76; 得胜湖相对重要性指数较高的前两位为河蚬和霍甫水丝蚓,  $I_{IRI}$  分别为 213.65 和 118.95; 蜈蚣湖的铜锈环棱螺相对重要性指数最高,  $I_{IRI}$  为 572.61, 明显远高于其他物种; 九龙口的霍甫水丝蚓相对重要性指数最高,  $I_{IRI}$  为 421.99, 明显高于其他物种。

## 2.3 底栖动物群落与环境因子之间的关系

底栖动物群落与筛选后环境因子冗余分析排序结果见表 3 和图 4。表 3 中  $PO_4^{3-}$ -P、DO 和 Chl-a 3 列为这 3 个环境因子与各排序轴的相关系数, 图 4 中数字为底栖动物种类代号, 代号所代表的具体的底栖动物类别见表 4。由表 3 可知前两轴特征值和

物种-环境关系累计变化百分比较大, 后两轴相对较低。前两轴基本反映底栖动物生物群落与环境因子关系。蒙特卡洛检验表明第一排序轴检验显著 ( $P=0.0012$ )。对所有轴两两进行检验, 结果同样显著 ( $P=0.0001$ )。从各因子进入排序的顺序及其对底栖群落变异解释量来看,  $PO_4^{3-}$ -P、DO 和 Chl-a 对底栖群落变异解释量相对较高, 表示这些环境因子对底栖生物群落影响较为显著。对湖泊底质的沉积物粒度分类表明, 研究区域底质主要为粉砂质砂 (zS) 和砂质粉砂 (sZ), 蒙特卡洛置换检验结果显示 zS 和 sZ 不显著 ( $P>0.1$ ), 未能进入排序, 但底质类

表 3 底栖动物群落与筛选后的环境因子的

冗余分析排序结果							
轴	特征值	物种-环境相关性	物种累计变化比/%	物种-环境关系累计变化百分比/%	与轴的相关性		
					$PO_4^{3-}$ -P	DO	Chl-a
1	0.168	0.936	16.8	46.2	0.9422	-0.6926	0.5283
2	0.115	0.913	28.3	31.8	0.1395	0.3285	0.2440
3	0.067	0.856	35.0	18.4	0.0295	0.4354	0.4642
4	0.013	0.903	36.3	5.6	0.1324	-0.1475	-0.3190

注:  $PO_4^{3-}$ -P、DO、Chl-a 的入选顺序和对底栖群落变异的解释量分别为 1、2、3 和 11.1%、11%、10.2%。

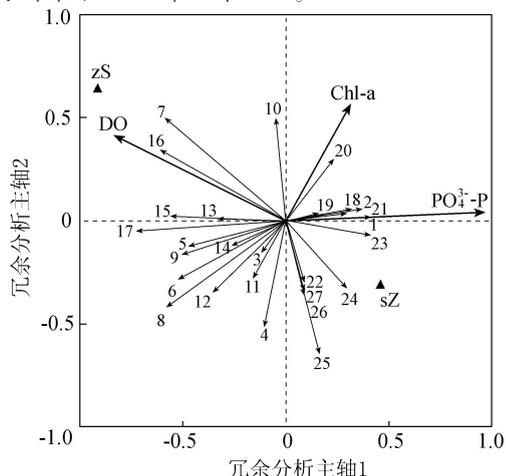


图 4 大型底栖动物生物密度与手动选择后的环境因子冗余分析排序

表 4 冗余分析中底栖动物的代号和种类

代号	种类	代号	种类
1	霍甫水丝蚓 ( <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i> )	15	背瘤丽蚌 ( <i>Lamprotula lei</i> )
2	苏氏尾鳃蚓 ( <i>Branchiura sowerbyi</i> )	16	河蚬 ( <i>Corbicula fluminea</i> Muller)
3	扁舌蛭 ( <i>Glossiphonia complanata</i> )	17	湖球蚬 ( <i>Sphaerium lacustre</i> Muller)
4	宽身舌蛭 ( <i>Glossiphonia lata</i> )	18	侧叶雕翅摇蚊 ( <i>Glyptotendipes lobiferus</i> )
5	宽体金线蛭 ( <i>Whitmania pigra</i> Whitman)	19	黄色羽摇蚊 ( <i>Chironomus flaviplumus</i> )
6	铜锈环棱螺 ( <i>Bellamyia aeruginosa</i> )	20	叶二叉摇蚊 ( <i>Dicortendipes lobifer</i> )
7	大沼螺 ( <i>Parafossarulus eximius</i> Frauenfeld)	21	浅白雕翅摇蚊 ( <i>Glyptotendipes pallens</i> Meigen)
8	纹沼螺 ( <i>Parafossarulus striatulus</i> Benson)	22	红裸须摇蚊 ( <i>Prosilocerus akamusi</i> Tokunaga)
9	方格短沟蜷 ( <i>Semisulcospira cancellata</i> Benson)	23	中国长足摇蚊 ( <i>Tanypus chinensis</i> )
10	光滑狭口螺 ( <i>Stenothyra glabra</i> )	24	梯形多足摇蚊 ( <i>Polypedilum scalaenum</i> )
11	长角涵螺 ( <i>Alocinma longicornis</i> Benson)	25	毛蠓科一种 ( <i>Clogmia albipunctata</i> sp.)
12	淡水壳菜 ( <i>Limnoperna fortune</i> Dunker)	26	锯齿新米虾 ( <i>Neocaridina</i> )
13	圆顶珠蚌 ( <i>Unio douglasiae</i> )	27	钩虾属一种 ( <i>Gammarid</i> sp.)
14	椭圆背角无齿蚌 ( <i>Anodonta woodiana pacifica</i> Heude)		

型是反映底栖动物栖息环境的主要因子,故将其投影到排序图中来反应其与底栖动物相关关系。

### 3 结果与讨论

冗余分析表明  $PO_4^{3-}$ -P、Chl-a 和 DO 对里下河腹部区底栖群落变异解释度相对较高,这 3 个因子主要反映了水体的污染水平和营养状态。水体富营养化是里下河地区乃至整个长江中下游湖泊面临的主要环境问题,富营养化对湖泊底栖动物群落结构产生了严重影响。富营养化会导致水体中的浮游植物大量扩增,而浮游植物的分解大量消耗 DO,限制了对 DO 较为敏感的物种的生存。本研究发现,河蚬和无齿蚌等软体动物的数量与 DO 值呈正相关关系,一方面这些物种本身对 DO 就有较高的需求<sup>[14]</sup>,另一方面可能是在富营养化状态下,使得耐低氧能力差的物种对 DO 的需求更为敏感,富营养化程度的加剧容易引起这些物种的大量死亡。从各个湖泊底栖动物生物密度分布看出,富营养化程度相对较低的大纵湖物种类型更为丰富,优势种为腹足类的铜锈环棱螺和长角涵螺。而富营养化程度相对较高的九龙口物种类型单一,且主要由典型耐污类群寡毛类和摇蚊幼虫组成,优势物种为霍甫水丝蚓。这种现象表明随着富营养化程度的加深,底栖动物类群趋向单一,且优势种从大个体的种类(如腹足纲、双壳纲)转变为小个体的种类(如摇蚊幼虫、寡毛类),底栖动物的多样性也显著降低。这主要是因为小个体的种类对环境的适应能力较强,而大部分大个体种类耐污能力弱,生活周期较长,种群恢复易受到环境条件的限制。有许多其他学者在研究中得到了类似的结论,如 Frouin<sup>[15]</sup>在研究底栖动物群落时发现多样性最高值出现在中等营养水平湖泊中;蔡永久等<sup>[6]</sup>对长江中下游不同类型湖泊底栖动物群落结构的研究发现,当湖泊营养水平在中等水平之上时,底栖动物多样性与湖泊营养状态呈显著负相关;张莹等<sup>[16]</sup>的研究表明,水体中营养盐物质增加时,大型底栖动物多样性相应降低。

高等水生植物对大型底栖动物影响也十分显著。大纵湖为草型湖泊,采样时间为春季,湖泊中大型水生植物种类丰富,氮磷营养盐水平在 4 个湖泊中相对较低,底栖生物种类相对较丰富,生物多样性高,生物类群主要由按摄食功能群分为刮食者的腹足纲组成。梁彦龄等<sup>[17]</sup>研究表明,在草型湖泊中,刮食者丰度占绝对优势。这与本研究的结论相符。丰富的水生植物对维持大型底栖动物多样性方面起着极为重要的作用,大量的水生植物直接改变了湖泊生态系统的空间结构,并增加了空间、食源的异质

性。螺类与水生植物存在互惠共利的关系,植物为螺类提供空间和食源,螺类的牧食去除植物表面附着生物层,有利于植物生长<sup>[18]</sup>。藻型湖泊的功能摄食类群主要以收集者为主<sup>[19]</sup>,得胜湖、蜈蚣湖和九龙口为藻型湖泊,大型水生植物生物量小,底栖动物生物多样性偏低,优势种多为小个体的耐污种。研究表明,沉水植被丰富的水域有利于甲壳类动物生存。冗余分析结果显示,甲壳类动物与 Chl-a 呈负相关。雷泽湘等<sup>[20]</sup>对太湖的大型水生植被的研究表明,无草区水体 Chl-a 质量浓度为有草区的 3 倍左右,Chl-a 与大型水生植物生物量呈反比,因为甲壳类动物在藻型湖泊中缺乏多层次的食物来源和有效的隐蔽场所<sup>[21]</sup>,生物密度较草型湖泊中的明显偏低,与本研究结果相符。

底质类型是影响底栖动物分布的主要因素之一。本研究中,软体动物生物密度在底质粒度较粗区域较高,而摇蚊幼虫、寡毛类动物等小个体动物则相反。富营养化会对沉积物粒径大小产生影响。富营养化程度高的湖泊底质有机质含量高,底质偏细<sup>[22]</sup>,这可能是耐污能力相对较强的物种与较细底质类型正相关的原因,而相关性不显著可能是因为本次研究中各采样点的底质类型差异并不大。底质类型对河蚬影响较大,蔡永久等<sup>[14]</sup>对太湖研究时发现,河蚬在粒径较粗的区域丰度高,而在淤泥底质、富营养化严重的区域密度低,这与本文的结果相符。本研究在得胜湖东南部采集获得大量河蚬样本,对照底质状况进行分析,发现得胜湖东南部底质较粗,属于粉砂质砂。得胜湖虽然整体处于富营养化状态,但较粗的底质可能有利于河蚬掘穴固定栖居,从而使得河蚬的生物量保持较高水平。

### 4 结论

a.  $PO_4^{3-}$ -P、Chl-a 和 DO 是影响里下河腹部地区底栖生物群落结构的主要环境因子,这 3 个因子主要反映了水体的污染水平和营养状态。富营养化程度相对较高的湖泊大型底栖动物生物多样性相对较低,耐污种的种群密度占据优势。

b. 高等水生植物对大型底栖动物群落结构有一定的影响,沉水植物较为丰富的大纵湖大型底栖动物生物多样性较高,而其余湖泊大型底栖动物种类较为单一。

c. 本研究中,底质类型对大型底栖动物群落结构影响不显著,但软体动物生物密度在底质粒度较粗区域较高,摇蚊幼虫、寡毛类等小个体动物则相反。

## 参考文献:

- [ 1 ] 谭少华,倪绍祥,周飞. 苏北里下河地区湿地资源可持续利用的思考[J]. 农村生态环境,2003,19(3):61-64. (TAN Shaohua, NI Shaoxiang, ZHOU Fei. Sustainable utilization of wetland in Lixiahe region in north Jiangsu Province[J]. Rural Eco-Environment, 2003, 19(3): 61-64. (in Chinese))
- [ 2 ] 柯长青. 苏北里下河地区湿地资源的可持续利用研究[J]. 中国人口·资源与环境,2001,11(51):39-41. (KE Changqing. Sustainable exploitation and utilization of wetland resources in Lixiahe region, northern Jiangsu[J]. China Population, Resources and Environment, 2001, 11(51):39-41 (in Chinese))
- [ 3 ] COVICH A P, PALMER M A, CROWL T A. The role of benthic invertebrate species in freshwater ecosystems: zoo benthic species influence energy flows and nutrient cycling [J]. BioScience, 1999, 49(2): 119-127.
- [ 4 ] BECK M W, HATCH L K. A review of research on the development of lake indices of biotic integrity [J]. Environmental Reviews, 2009, 17(17): 21-44.
- [ 5 ] 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 Zhijun, XIE Ping, TANG Huijuan, et al. The influence of eutrophication upon community structure and biodiversity of macrozoobenthos [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2001, 25(3): 210-216. (in Chinese))
- [ 6 ] 蔡永久, 姜加虎, 张路, 等. 长江中下游湖泊大型底栖动物群落结构及多样性[J]. 湖泊科学, 2010, 22(6): 811-819. (CAI Yongjiu, JIANG Jiahu, ZHANG Lu, et al. Community structure and biodiversity of macrozoobenthos of typical lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(6): 811-819. (in Chinese))
- [ 7 ] 熊金林, 梅兴国, 胡传林. 不同污染程度湖泊底栖动物群落结构及多样性比较[J]. 湖泊科学, 2003, 15(2): 160-168. (XIONG Jinlin, MEI Xingguo, HU Chuanlin. Comparative study on the community structure and biodiversity of zoobenthos in lakes of different pollution states [J]. Journal of Lake Sciences, 2003, 15(2): 160-168. (in Chinese))
- [ 8 ] TERBRAAK C J F. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector method for multivariate direct gradient analysis [J]. Ecology, 1986, 67(5): 1167-1179.
- [ 9 ] 魏复盛. 水和废水监测分析方法 [M]. 3 版. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.
- [ 10 ] FOLK R L, ANDREWS P B, LEWIS D W. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand [J]. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 1970, 13(4): 937-968.
- [ 11 ] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准 [J]. 中国环境监测, 2002, 18(5): 47-49. (WANG Mingcui, LIU Xueqin, ZHANG Jianhui. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication [J]. Environmental Monitoring in China, 2002, 18(5): 47-49. (in Chinese))
- [ 12 ] PINKAS E R. Ecology of the agamid lizard *Amphibolurus isolepis* in Western Australia [J]. Copeia, 1971(3): 527-536.
- [ 13 ] LEPS J, MILAUER P. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [ 14 ] 蔡永久, 龚志军, 秦伯强. 太湖软体动物现存量及空间分布格局(2006—2007年) [J]. 湖泊科学, 2009, 21(5): 713-719. (CAI Yongjiu, GONG Zhijun, QING Boqiang. Standing crop and spatial distributional pattern of Mollusca in Lake Taihu, 2006-2007 [J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(5): 713-719. (in Chinese))
- [ 15 ] FROUIN P. Effects of anthropogenic disturbances of tropical soft-bottom benthic communities [J]. Marine Ecology Progress, 2000, 194(1): 39-53.
- [ 16 ] 张莹, 吕振波, 徐宗法, 等. 山东半岛南部海湾底栖动物群落生态特征及其与水环境的关系 [J]. 生态学报, 2011, 31(15): 4455-4467. (ZHANG Ying, LYU Zhenbo, XU Zongfa, et al. Ecological characteristics of macrobenthic communities and their relation to water environmental factors in four bays of southern Shandong Peninsula [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(15): 4455-4467. (in Chinese))
- [ 17 ] 梁彦龄, 刘伙泉. 草型湖泊资源、环境与渔业生态学管理(一) [M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [ 18 ] 李宽意, 文明章, 杨宏伟, 等. “螺-草”的互利关系 [J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5427-5432. (LI Kuanyi, WEN Mingzhang, YANG Hongwei, et al. Mutualistic relationship between freshwater snails and aquatic macrophytes [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5427-5432. (in Chinese))
- [ 19 ] 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. (YAN Yunjun, LI Xiaoyu, LIANG Yanling. A comparative study on community structure of macrozoobenthos between macrophytic and algal lakes [J]. Journal of Lake Sciences, 2005, 17(2): 176-182. (in Chinese))

(下转第 156 页)

c. 农村生活污水合理处置。农村分散式生活污水处理方式主要有埋地式微动力氧化沟、厌氧滤池-氧化塘-植物生态渠、厌氧池-跌水充氧接触氧化-人工湿地、厌氧池-滴滤池-人工湿地等技术<sup>[4-6]</sup>,根据当地的自然、经济和社会条件,因地制宜地选择适合处理技术。

d. 疏通支浜河道,增强水动力。农村支浜河道多淤积严重,多数成断头浜,俗话讲“流水不腐”,农村支浜河道水动力不足是发生“黑臭”现象的重要原因。因此,必须实施支浜河道清淤和基底改造,保障水动力条件。

e. 河流生态系统修复。通过坡岸生态治理、水生生态植物群落重构、鱼类放养等措施,重建河流生态系统<sup>[7-8]</sup>。

### 3.3 制定严格的污染物排放标准

随着太湖流域近年来“铁腕治污”的实施,水环境污染已基本遏制,但是太湖流域是我国经济最发达、投资增长最具活力的地区,污染物排放量必然还会增加,减排压力将持续增大。因此,除了实施太湖流域执行国家污染物排放标准外,还可以从以下两个方面进一步削减污染物排放量:①提高太湖流域城镇集中式污水处理厂排放标准,推行城镇集中式污水处理厂排放标准达地表水质量Ⅳ~Ⅴ类标准。②太湖流域除纺织染整、化工、造纸、钢铁、电镀、食品制造等6大行业外,电子、光伏、生物医药等新兴行业也日益蓬勃发展,其污染负荷在各污染源的排放中所占比重不容忽视,目前关于电子、光伏等新兴行业的国家排放标准已不能满足太湖流域水环境管理要求,因此,可制定电子、光伏、生物医药等新兴产业地方排放标准。

### 3.4 提高治理工程运行管理水平

a. 构建项目监管长效机制,实现工程项目事前、事中和事后全过程监督。建立项目后评价制度,形成建设—评估—反馈的良性循环。

b. 探索农村面源及生态修复等工程长效管护新模式,推广各地成熟的管理经验,对已建成运行的污染治理设施或公益性生态湿地工程,实行公开招标,由环保第三方企业负责具体管护工作,有关部门监督实施,地方安排相应资金给予支持。探索形成一套责任明确、奖惩到位的项目监管新机制。

### 参考文献:

[1] 秦伯强,胡维平,陈伟民,等.太湖水环境演化过程与机理[M].北京:科学出版社,2004:1-28.  
[2] 方淑荣,刘正库.论农业面源污染及其防治对策[J].农业科技管理,2006,25(3):22-23. (FANG Shurong, LIU Zhengku. The discussion of agricultural non-point source

pollution and countermeasures [J]. Agricultural Science and Technology Management, 2006, 25 (3): 22-23. (in Chinese))  
[3] 宋家永,李英涛,宋宇,等.农业面源污染的研究进展[J].中国农学通报,2010,26(11):362-365. (SONG Jiayong, LI Yingtao, SONG Yu, et al. Research progress of agricultural non-point source pollution [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(11): 362-365. (in Chinese))  
[4] 孙兴旺,马友华,王桂苓,等.中国重点流域农村生活污水处理现状及其技术研究[J].中国农学通报,2010,26(18):384-388. (SUN Xingwang, MA Youhua, WANG Guiling, et al. Research on current treatment status and technologies of rural domestic wastewater in China major basins [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(18): 384-388. (in Chinese))  
[5] 苏东辉,郑正,王勇,等.农村生活污水处理技术探讨[J].环境科学与技术,2005,28(1):79. (SU Donghui, ZHEN Zheng, WANG Yong, et al. Discussion on treatment technology of rural domestic sewage [J]. Environmental Science & Technology, 2005, 28(1): 79. (in Chinese))  
[6] 阮晓卿,蒋岚岚,陈豪,等.江苏不同地区典型农村生活污水处理适用技术[J].中国给水排水,2012,28(18):44-47. (RUAN Xiaqing, JIANG Lanlan, CHEN Hao, et al. Typical technologies applicable for rural domestic sewage treatment in different areas in Jiangsu Province [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(18): 44-47. (in Chinese))  
[7] 陈荷生,宋祥甫,邹国燕.太湖流域水环境综合整治与生态修复[J].水利水电科技进展,2008,28(3):76-79. (CHEN Hesheng, SONG Xiangfu, ZOU Guoyan. Comprehensive improvement of water environment and ecological restoration in Taihu Lake Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(3): 76-79. (in Chinese))  
[8] 董哲仁.生态水工学探索[M].北京:中国水利水电出版社,2007:225-255.

(收稿日期:2015-05-28 编辑:徐娟)

(上接第104页)

[20] 雷泽湘,徐德兰,顾继光,等.太湖大型水生植物分布特征及其对湖泊营养盐的影响[J].农业环境科学学报,2008,27(2):698-704. (LEI Zexiang, XU Delan, GU Jiguang, et al. Distribution characteristics of aquatic macrophytes and their effects on the nutrients of water and sediment in Taihu Lake [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(2): 698-704. (in Chinese))  
[21] 温周瑞,谢平,徐军.太湖贡湖湾虾类种类组成与时空分布特征[J].湖泊科学,2011,23(6):961-966. (WEN Zhouhui, XIE Ping, XU Jun. Spatial and temporal patterns of species composition and distribution of shrimp community in the Gonghu Bay, Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(6): 961-966. (in Chinese))  
[22] HEISLER J, GLIBERT P M, BURKHOLDER J M, et al. Eutrophication and harmful algal blooms: a scientific consensus [J]. Harmful Algae, 2008, 8(1): 3-13.

(收稿日期:2015-06-11 编辑:王芳)