

溇湖入湖河流春季大型底栖动物群落结构及水质生物学评价

邵勇¹ 王洪杨^{2*} 徐蛟³ 杭丹¹ 陆永军² 陆彦^{2*} 吴攀² 朱明成²

(¹江苏省太湖治理工程建设管理局, 江苏无锡 214100; ²南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029; ³江苏省水利工程建设局, 南京 210029)

摘要 分别于2018年4月和2019年4月对溇湖入湖河流底栖动物开展调查, 并利用生物指数对水质进行生物学评价。结果表明: 共鉴定溇湖入湖河流底栖动物28种, 以重度耐污种霍甫水丝蚓(优势度为0.46)和中等耐污种铜锈环棱螺(优势度为0.11)占据绝对优势。生物多样性方面以鹤溪河最高, 湟里河、扁担河次之, 夏溪河及入湖河口最低, 水生植物分布是影响各区域底栖动物多样性的重要因素。卡尔森营养状态指数(TSI)与水质污染等级生物评价结果基本一致, 以新孟河延伸拓浚工程沿线为界, 鹤溪河、夏溪河、湟里河中上游河段处于中度富营养化水平, 水体为轻-中污染状态, 而下游河段、扁担河及入湖河口处于重度富营养化水平, 水体为中-重污染状态。

关键词 溇湖; 入湖河流; 寡毛类; 软体动物; 群落结构; 多样性; 水质评价

Community structure of benthic macro-invertebrates and biological assessment of water quality in the inflowing rivers of Lake Gehu in spring. SHAO Yong¹, WANG Hong-yang^{2*}, XU Jiao³, HANG Dan¹, LU Yong-jun², LU Yan^{2*}, WU Pan², ZHU Ming-cheng² (¹Jiangsu Province Taihu Treatment Project Construction Administration, Wuxi 214100, Jiangsu, China; ²State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering Science, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; ³Water Conservancy Project Construction Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China).

Abstract: In this study, we investigated the community structure of benthic macro-invertebrates in the inflowing rivers of Lake Gehu in April of both 2018 and 2019, and evaluated water quality using biological indices. Twenty-eight species of benthic macro-invertebrates were identified in the inflowing rivers of Lake Gehu. *Limnodrilus hoffmeisteri* (dominance index: 0.46) with high pollution resistance and *Bellamyia aeruginosa* (dominance index: 0.11) with moderate pollution resistance were the dominant species. In terms of biodiversity, Hexi River was the highest, followed by Huangli and Biandan rivers; Xiaxi River and the estuary into the lake were the lowest. The distribution of aquatic plants might be one of the most important factors determining the diversity of benthic macro-invertebrates in different regions. The Carlson nutrition status index was consistent with the biological indices in water quality assessment. With the extension of Ximmeng River and dredging project, the middle and upper reaches of Hexi, Xiaxi, and Huangli rivers were at a moderate eutrophication level, with water body being lightly to moderately polluted; whereas the lower reaches of Biandan River and estuaries into the lake were at a severe eutrophication level, with water body being moderately to heavily polluted.

Key words: Lake Gehu; inflowing river; oligochaete; mollusk; community structure; diversity; water quality evaluation.

底栖动物是水生生态系统中的重要生物类群,一般生活在水体底部,往往能够进行有机质分解、加速营养元素转化并丰富食物链,在水生生态系统的物质和能量循环中起着关键作用(Covich *et al.*, 1999; 马秀娟等, 2012)。底栖动物区域性强,生活周期长,具有易采集、易鉴定的特点,且对环境因子的敏感程度不同,群落结构时空分布往往受制于环境特征的变化,可以综合反映栖息地物理、化学及生态特性,据此可用于河流生态系统健康状态评估(Thorne *et al.*, 1997; Wang, 2017)。底栖动物种类组成、群落结构、生物多样性等特征是反映水环境特点和质量的重要指标,被广泛应用于水生态监测和水质评价(王伟莉等, 2013; 张宇航等, 2019),主要以大型底栖动物(个体大于 500 μm)为主(潘保柱等, 2012)。以往研究认为,生物指数相对于水质指标,能更全面反映河流健康状态,国内针对水质生物学评价方面也做过大量研究工作(丁建华等, 2017; 汪兴中等, 2018)。因此,开展底栖动物群落生态学研究,建立适合研究区域的水质生物学评价标准,对河流生态系统保护与管理具有重要的指导意义。

新孟河延伸拓浚工程北起长江,自老新孟河拓浚至京杭运河,过京杭运河后新开河向南延伸至北干河,拓浚北干河连接洮湖、溲湖,拓浚太溲运河和漕桥河入太湖,全长 116.72 km。受其引排水调度影响,沿线片区水系格局将会发生改变(桂青, 2016),进而影响沿线河网生境条件,因此需要深入开展溲湖上游河网的水生态条件现状调查。以往研究主要关注溲湖单一物种与水环境因子的关系(杨洋等, 2017),或者是围绕溲湖底泥细菌群落、重金属以及水体富营养化方面(包先明等, 2016; 丁轶睿等, 2017),新孟河延伸拓浚工程对溲湖的影响则主要围绕水量、水质层面(闫红飞, 2015),对溲湖入湖河流的水环境调查及研究较少。鉴于溲湖上游水网的复杂性,本研究于春季对溲湖上游入湖河流水文、水质、底质及底栖动物进行调查,并对其分布特征进行评估和成因分析,为后续溲湖上游河网生态修复及水环境改善提供科学资料。

1 材料与方法

1.1 研究区域与样品采集

在溲湖上游分别选取鹤溪河、夏溪河、湟里河 3 条入湖河流,鹤溪河流经扁担河,与夏溪河交汇后共同汇入溲湖,探明其沿线及入湖河口水质、底栖动物

分布等生态环境现状,并基于生物学指数对溲湖入湖河流水质作出简单评价。研究区域共选取 24 个采样点,根据地理位置和生境特征,在鹤溪河、夏溪河及湟里河 3 条河流沿线分别各布设 5 个采样点,扁担河布设 2 个采样点,孟津河布设 1 个采样点,因孟津河采样点在扁担河出口附近,将其归为扁担河一类。孟津河有 2 个人湖河口,湟里河有 1 个人湖河口,分别在各河口入湖延长线一侧布设 2 个采样点(图 1)。限于时间、人力及物力等因素,调查分别在 2018 年 4 月(春季)和 2019 年 4 月(春季)进行,采样数据整合统一。

底栖动物样品采集用 1/20 m^2 彼得森采泥器,每采样点采集 2 次,泥样经 60 目尼龙筛网晒洗后,在解剖盘中逐一拣出底栖动物,并用 5% 甲醛溶液保存后带回实验室,鉴定至尽可能低的分类单元(Morse *et al.*, 1994; Epler, 2001; 王俊才等, 2011)。用解剖镜和生物显微镜对各分类单元进行种类鉴定和计数,生物量用万分之一电子天平称重。

1.2 环境因子监测

采用 YSI 多参数水质分析仪测定水温、pH、底层溶解氧(DO),在河流横向断面左、中、右位置用流速仪监测流速等指标,透明度(SD)采用赛氏盘测定。利用有机玻璃采水器采集水样,各水样至少 500 mL,水样冷藏保存并迅速带回实验室,铵态氮

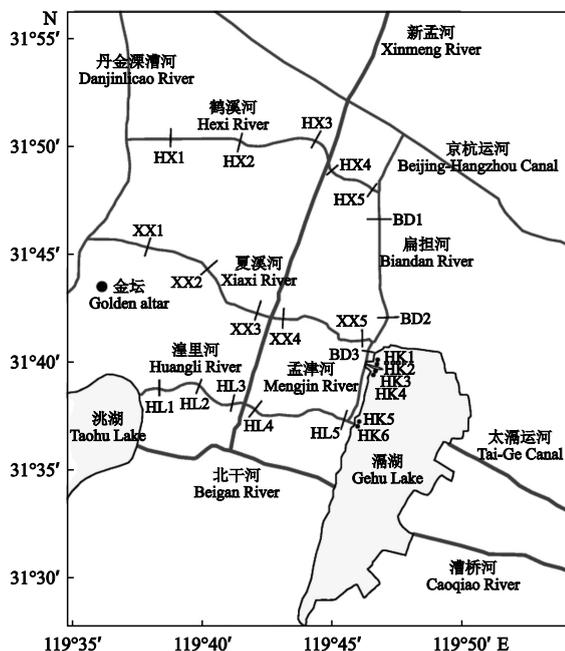


图 1 溲湖入湖河流采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in inflowing rivers of Lake Gehu

(NH₄⁺-N)用微量流动注射分析仪测定,参考国家标准方法(国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编辑委员会,2002)测定总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD_{Mn})、叶绿素 a(Chl a)。采样区域环境特征如表 1 所示。

1.3 数据分析

1.3.1 生物多样性指数 底栖动物群落特征分析
采用 Shannon 多样性指数、Margalef 丰富度指数、

Pielou 均匀度指数和物种优势度指数表征,计算方法如下:

Shannon 多样性指数 (H) (Spellerberg, 2003) 公式:

$$H = - \sum_{i=1}^s \frac{n_i}{N} \times \ln \frac{n_i}{N}$$

Margalef 丰富度指数 (D) (Margalef, 1957) 公式:

表 1 采样区域水环境特征

Table 1 Characteristics of aquatic environment in sampling areas

调查区域 Survey area	采样点 Sampling sites	是否通航 Navigation	底质 Substrate	生境特征 Habitat characteristics
鹤溪河 Hexi River	HX1	否 No	淤泥 Silt	菹草、水鳖、金鱼藻、水绵、轮叶黑藻 Water caltrop, Frogbit, Hornwort, Spirogyra, Hydrilla verticillata
	HX2	否 No	淤泥 Silt	水花生、芦苇、菱角、金鱼藻 Alternanthera philoxeroides, Reed, Water chestnut, Hornwort
	HX3	否 No	硬质 Hard	菹草、菹蒲、菱角、水鳖、水绵 Water caltrop, Calamus, Water chestnut, Frogbit, Spirogyra
	HX4	否 No	硬质 Hard	芦苇、菹草、两岸植被较多,城镇 Reed, Water caltrop, More vegetation on both banks, Town
	HX5	否 No	硬泥 Hardened mud	菹草、泄洪通道、居民区 Water caltrop, Flood discharge alleyway, Residential area
夏溪河 Xiayi River	XX1	否 No	淤泥 Silt	菹蒲、芦苇,城镇 Calamus, Reed, Town
	XX2	否 No	淤泥 Silt	菹蒲、芦苇、金鱼藻,工业区 Calamus, Reed, Hornwort, Industrial zone
	XX3	否 No	淤泥 Silt	芦苇 Reed
	XX4	是 Yes	硬质 Hard	芦苇,居民区、多生活污水、垃圾 Reed, Residential area, Domestic sewage and garbage
	XX5	是 Yes	硬质 Hard	水绵、无沉水植物,居民区 Spirogyra, No submerged plants, Residential area
湟里河 Huangli River	HL1	否 No	淤泥 Silt	芦苇、菹蒲、水鳖、菱角、菹草 Reed, Calamus, Frogbit, Water chestnut, Water caltrop
	HL2	否 No	硬质 Hard	芦苇、菹蒲、水绵、菱角 Reed, Calamus, Spirogyra, Water chestnut
	HL3	否 No	硬质 Hard	芦苇、菱角、水鳖、菹蒲、水绵 Reed, Water chestnut, Frogbit, Water caltrop, Spirogyra
	HL4	是 Yes	硬质 Hard	水生植被较多、芦苇,城镇、排污口 More aquatic vegetation, Reed, Town, Sewage outlet
	HL5	是 Yes	沙石 Gravel	芦苇、水绵,浑浊 Reed, Spirogyra, Muddy
扁担河 Biandan River	BD1	是 Yes	淤泥 Silt	芦苇、菹草,厂房排污、交汇口 Reed, Water caltrop, Workshop sewage, Confluence
	BD2	是 Yes	沙质 Sand	菹草 Water caltrop
	BD3	是 Yes	硬泥 Hardened mud	大排水孔 Large drainage hole
河口 Estuary	HK1	否 No	硬质 Hard	芦苇丛状分布,浅滩多 Clump distribution of reed, Shoal
	HK2	否 No	淤泥 Silt	芦苇丛状分布,油污 Clump distribution of reed, Greasy dirt
	HK3	否 No	淤泥 Silt	芦苇丛状分布 Clump distribution of reed
	HK4	否 No	淤泥 Silt	芦苇、菹草盖度大 Large coverage of reed and water caltrop
	HK5	是 Yes	淤泥 Silt	沿岸有芦苇带、开阔水域有零星芦苇分布 Reed belts along the banks, sporadic reed in open waters
	HK6	是 Yes	淤泥 Silt	沿岸有芦苇带、开阔水域有零星芦苇分布 Reed belts along the banks, sporadic reed in open waters

$$D = \frac{S-1}{\ln N}$$

Pielou 均匀度指数(J) (Pielou, 1975) 公式:

$$J = \frac{H}{\ln S}$$

式中, n_i 表示第 i 种的个体数, N 表示总个体数, S 表示总物种数。

优势度指数(Lampitt *et al.*, 1993) (Y) 公式:

$$Y = \frac{n_i}{N} f_i$$

式中, f_i 表示该物种出现的点位数占总点位数的百分比; 当 $Y > 0.02$ 时, 定义该物种为优势种。

1.3.2 营养状态指数 卡尔森指数(TSI)多应用于湖泊营养状态评价, 其中 TP 、 $Chl a$ 及 SD 常被选为评价指标。由于河流水沙交换周期较快, $Chl a$ 和 SD 作为河流营养状态评价指标具有一定的局限性, 但在春季期间, 这两个指标受河流流量及泥沙含量影响较小。因此, 为评价各入湖河流春季的营养状态, 本文参照蔡华庆等(2002)改进的营养状态指数方法计算各站点的综合营养状态指数:

$$TSI = 0.54TSI(Chla) + 0.297TSI(SD) + 0.163TSI(TP)$$

各营养状态指数按照 Carlson 提出的营养状态指数方法计算:

$$TSI(Chla) = 10(6 - (2.04 - 0.68(\ln(Chla))) / \ln 2)$$

$$TSI(SD) = 10(6 - \ln(SD) / \ln 2)$$

$$TSI(TP) = 10(6 - \ln(48/TP) / \ln 2)$$

式中, $Chla$ 、 SD 、 TP 单位分别为 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 m 、 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.3.3 生物学评价方法 Goodnight 修正指数(马秀娟等, 2012) (GBI):

$$GBI = (N - N_0) / N$$

式中, N 为样品中底栖动物个体总数, N_0 为样品中寡毛类个体总数。

BPI 生物学污染指数(魏云慧等, 2006):

$$BPI = \log(N_1 + 2) / (\log(N_2 + 2) + \log(N_3 + 2))$$

式中, N_1 为寡毛类、蛭类和摇蚊幼虫个体数, N_2 为多毛类、甲壳类、除摇蚊幼虫以外其他的水生昆虫个体数, N_3 为软体动物个体数。

选用 TSI 营养状态指数评价水体营养水平。由于不同区域样本相差较大, 利用软件 SPSS 选取 Kruskal-Wallis 非参数检验方法比较各支河环境参数及底栖动物群落基本指标(密度、生物量及多样

性)差异性。聚类分析选取 PAST 软件, 采用 Bray-Curtis 相似性指数分析不同区域底栖动物群落相似性, 对各入湖河流底栖动物群落进行聚类, 聚类分析前底栖动物数据(密度、生物量)进行 $\ln(x+1)$ 对数转换。利用 Origin 2018 对水体环境理化因子进行主成分分析(PCA), 利用软件 Canoco 5 进行典范对应分析(CCA), 分析底栖动物群落与环境因子之间的关系。各生物指数与水质等级标准见表 2。

2 结果与分析

2.1 底栖动物群落结构

2.1.1 种类组成和优势种 在涪湖入湖河流共采集到大型底栖动物 28 种(表 3), 软体动物种类最多, 共计 10 种, 其中腹足纲 6 种, 双壳纲 4 种; 摇蚊幼虫次之, 共计 8 种; 甲壳纲共计 6 种, 蛭纲共计 2 种; 寡毛纲也仅有 2 种, 分别为霍甫水丝蚓和苏氏尾鳃蚓。从各支河及河口底栖动物种类组成来看, 鹤溪河底栖动物物种数最高, 共计 15 种, 其中以软体动物和甲壳纲居多, 各计 5 种; 湟里河次之, 共 14 种, 但摇蚊幼虫及软体动物种类较多, 分别为 6 种和 5 种; 扁担河底栖动物种类共计 11 种, 以软体动物类为主, 计 6 种; 夏溪河及河口区域底栖动物种类最少, 分别为 8 种和 6 种。入湖河口区域未采集到摇蚊幼虫, 以软体动物类为主, 计 4 种。

研究区域的优势类群组成有一定的相似特征(表 4), 霍甫水丝蚓和铜锈环棱螺在各入湖河流中均为优势种, 其中霍甫水丝蚓为绝对优势种。鹤溪河、夏溪河、湟里河、扁担河及入湖河口霍甫水丝蚓优势度指数(Y)分别为 0.233、0.508、0.167、0.847、0.724, 铜锈环棱螺(夏溪河除外)优势度指数(Y)分

表 2 四种生物指数与水质等级标准*

Table 2 Four biological indices and water quality grading standards*

水质等级 Water quality grade	GBI 指数 index	BPI 指数 index	Shannon 指数 Shannon index	Margalef 指数 Margalef index
清洁 Cleanliness	>0.8	<0.1	>3	>3.5
轻度污染 Lightly pollution	0.6~0.8	0.1~0.5	2~3	2~3.5
中度污染 Moderately pollution	0.2~0.6	0.5~5	1~2	1~2
重度污染 Heavily pollution	0~0.2	>5	0~1	0~1

注: * 水质等级标准参考文献(池仕运等, 2009; 马秀娟等, 2012; 蔡永久等, 2014)。

Note: * References of water quality grade standards (Chi *et al.*, 2009; Ma *et al.*, 2012; Cai *et al.*, 2014).

表 3 春季涪湖入湖河流底栖动物种类与组成*

Table 3 Species composition of benthic macroinvertebrates in inflowing rivers of Lake Gehu in spring*

大型底栖动物种类 Benthic macroinvertebrates species	鹤溪河 Hexi River	夏溪河 Xiaxi River	湟里河 Huangli River	扁担河 Biandan River	入湖河口 Estuary into the lake	入湖河流(总) Inflowing rivers of Lake Gehu (Total)	
寡毛类 Oligohairs	霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	104/0.278	25.7/0.07	60.4/0.179	466.7/2.065	183.3/0.42	143.8/0.473
	苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>	6.3/0.143	1.3/0.004		3/0.026		2/0.034
摇蚊幼虫 Chironomus	羽摇蚊 <i>Chironomus plumosus</i>	1.6/<0.001	1.3/0.002				0.6/<0.001
	中国长足摇蚊 <i>Tanytus chinensis</i>			1.8/0.008			0.4/0.002
plumosus	林间环足摇蚊 <i>Cricotopus sylvestris</i>		0.3/<0.001	0.4/<0.001	0.7/<0.001		0.3/<0.001
	柔嫩翅摇蚊 <i>Glyptotendipes cauliginellus</i>			0.9/0.002			0.2/<0.001
	德永雕翅摇蚊 <i>Glyptotendipes tokunagai</i>	1/<0.001					0.2/<0.001
	二叉摇蚊属一种 <i>Dicrotendipes</i> sp.			2.7/0.001	5.9/0.009		1.3/0.001
	前突摇蚊属一种 <i>Procladius</i> sp.			0.4/<0.001			0.1/<0.001
	齿斑摇蚊属一种 <i>Stictochironomus</i> sp.			0.4/<0.001			0.1/<0.001
软体动物 Mollusks	铜锈环棱螺 <i>Bellamya aeruginosa</i>	33.5/60.544	0.3/2.296	67.7/168.828	23/45.569	20/36.346	29/63.047
	长角涵螺 <i>Alocinma longicornis</i>	6.3/1.159	0.7/0.098			1.1/0.158	1.7/0.301
	纹沼螺 <i>Parafossarulus striatulus</i>	3.9/0.89					0.8/0.185
	大沼螺 <i>Parafossarulus eximius</i>	11.6/11.198		4.8/5.63	3/2.437		3.8/3.81
	萝卜螺属 <i>Radix</i> sp.			1.3/0.128		1.1/0.332	0.6/0.11
	膀胱螺属一种 <i>Physa</i> sp.	0.4/0.005		0.4/0.002			0.2/0.002
	圆顶珠蚌 <i>Unio douglasiae</i>			0.7/3.814	0.7/0.199		0.2/0.819
	椭圆背角无齿蚌 <i>Anodonta woodiana elliptica</i>				1.5/14.489		0.2/1.811
	淡水壳菜 <i>Limnoperna fortunei</i>				42.2/1.273		5.3/0.159
	河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>				3/4.52	4.4/7.738	1.5/2.499
其他 Others	春蜓科 <i>Gomphidae</i>	0.3/0.032					0.1/0.007
	负子蝻科 <i>Belostomatidae</i>	0.3/0.048					0.1/0.01
	龙虱科 <i>Dytiscidae</i> spp		0.3/0.009				0.1/0.002
	中国淡水蛭 <i>Novaculina chinensis</i>					1.1/0.057	0.3/0.014
	舌蛭属 <i>Glossiphonia</i> sp.	4.7/0.043		1.3/0.018	1.5/0.008		1.4/0.014
	日本沼虾 <i>Macrobrachium nipponense</i>	0.3/0.345		1.8/0.168			0.4/0.107
	秀丽白虾 <i>Exopalaemon modestus</i>	9.3/1.85	0.3/0.074				2/0.401
	米虾属 <i>Caridina</i> sp.	3/0.335					0.6/0.07

注: * 数值为涪湖上游各入湖河流大型底栖动物密度和生物量的平均值(密度/生物量)。

Note: * The numerical values are the average values (density/biomass) of the density and biomass of benthic macroinvertebrates in the inflowing rivers of Lake Gehu.

别为 0.144、0.466、0.028、0.063。霍甫水丝蚓最大平均密度(467 ind · m⁻²)分布于扁担河,而铜锈环棱

表 4 涪湖入湖河流大型底栖动物优势种

Table 4 Dominant species of macroinvertebrates in inflowing rivers of Lake Gehu

优势种 Dominant species	优势度(Y) Dominance index(Y)				
	鹤溪河 Hexi River	夏溪河 Xiaxi River	湟里河 Huangli River	扁担河 Biandan River	入湖河口 Estuary into the lake
霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	0.223	0.508	0.167	0.847	0.724
铜锈环棱螺 <i>Bellamya aeruginosa</i>	0.144		0.466	0.028	0.063
淡水壳菜 <i>Limnoperna fortunei</i>				0.026	
大沼螺 <i>Parafossarulus eximius</i>	0.05		0.033		
秀丽白虾 <i>Exopalaemon modestus</i>	0.03				

螺最大平均密度(68 ind · m⁻²)分布于湟里河。大沼螺属于鹤溪河和湟里河优势种,而秀丽白虾和淡水壳菜分别属于鹤溪河和扁担河优势种(表 2)。

2.1.2 密度、生物量及多样性 涪湖上游入湖河流 24 个采样点因水质、底质等因素的变化,大型底栖动物总密度为 1.67~1391.11 ind · m⁻²,总生物量为 0.02~378.7 g · m⁻²。鹤溪河、夏溪河、湟里河、扁担河及河口区域大型底栖动物平均密度分别为 186.5、30.3、145.1、551.1 和 211.1 ind · m⁻²,平均生物量分别为 76.9、2.6、178.8、70.6 和 45.1 g · m⁻²。研究区域密度空间变化趋势为扁担河>入湖河口>鹤溪河>湟里河>夏溪河,生物量空间变化趋势为湟里河>鹤溪河>入湖河口>扁担河>夏溪河(表 2)。

不同种类底栖动物在各河流及河口的总密度和总生物量占比表明底栖动物种类分布具有空间异质

性(图2)。从密度来看,夏溪河、扁担河及河口区域完全被寡毛类所主导,分别占比89%、85.2%和86.8%,而鹤溪河及湟里河则以寡毛类(占比分别为59.1%和41.7%)与螺类(占比分别为29.6%和51.2%)为优势类群;从生物量来看,虽然5个区域寡毛类密度占据主导地位,但生物量却很低,而螺类生物量具有绝对优势,其中鹤溪河、夏溪河及湟里河螺类占比分别达96%、93.8%和97.7%,而扁担河及入湖河口螺类占比分别为68%和81.8%,双壳类生物量在这两个区域也占有一定比例,分别为29%和17.2%。

如图3所示,Kruskal-Wallis非参数检验结果表明各区域底栖动物密度无显著性差异($P=0.14$),但生物量存在显著性差异($P<0.05$)。扁担河底栖动物密度显著高于其他区域,最高可达 $1391 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$,鹤溪河底栖动物密度变化较大($18.3 \sim 817.7$

$\text{ind} \cdot \text{m}^{-2}$),夏溪河密度较低($1.67 \sim 100 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$),而湟里河及河口区域底栖动物密度处于中等水平。生物量高值出现在鹤溪河($1.13 \sim 274.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)和湟里河($40.8 \sim 378.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$),并显著高于其他区域,夏溪河生物量总体较低。

图4给出了各支河及河口区域底栖动物群落Shannon多样性指数、Margalef丰富度指数及Pielou均匀度指数变化,3种多样性指数基本呈现出较为一致的变化趋势,其中Margalef丰富度指数在各区域间具有显著差异($P<0.05$)。总体而言,鹤溪河多样性最高,夏溪河及入湖河口多样性最低,湟里河及扁担河多样性处于中间水平。

2.1.3 聚类分析 基于Bray-Curtis方法判别漏湖入湖河流底栖动物群落的组间相似性(图5),研究区域24个采样点可在15%的相似水平上被聚类为3组,组1仅有XX2一个采样点,分布于夏溪河上游

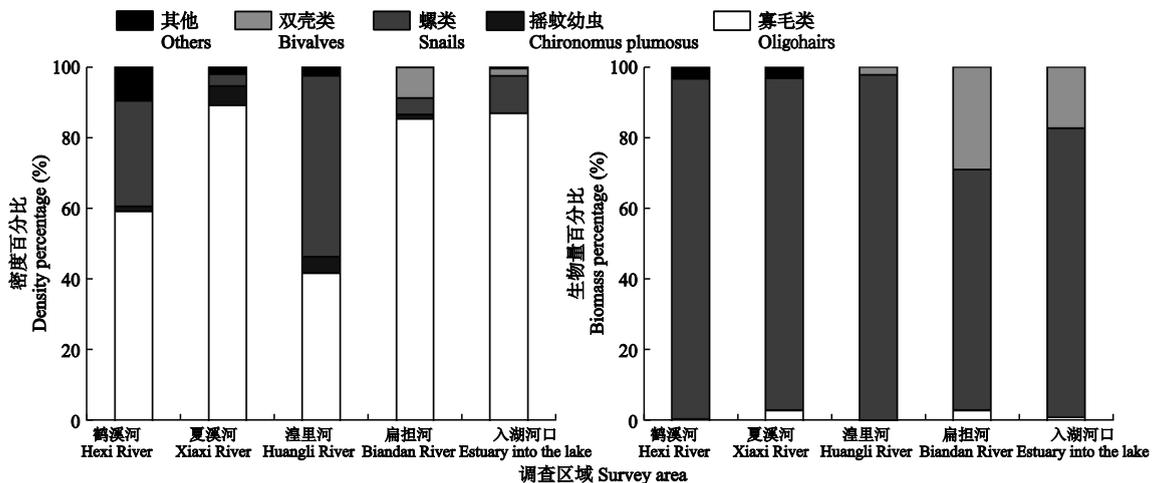


图2 漏湖入湖河流底栖动物密度和生物量比重

Fig.2 Proportion of density and biomass of benthic macroinvertebrates in inflowing rivers of Lake Gehu

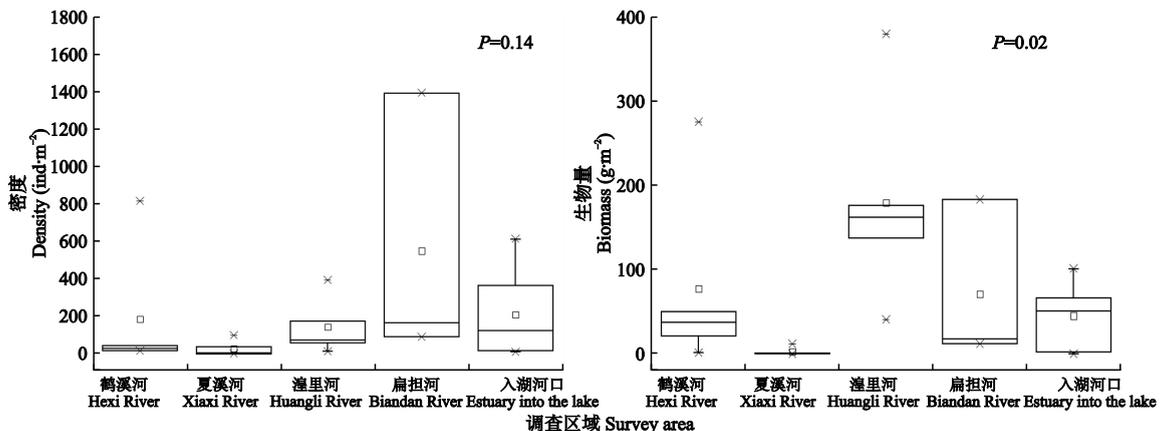


图3 漏湖入湖河流底栖动物密度和生物量箱线图

Fig.3 Boxplot of density and biomass of benthic macroinvertebrates in inflowing rivers of Lake Gehu

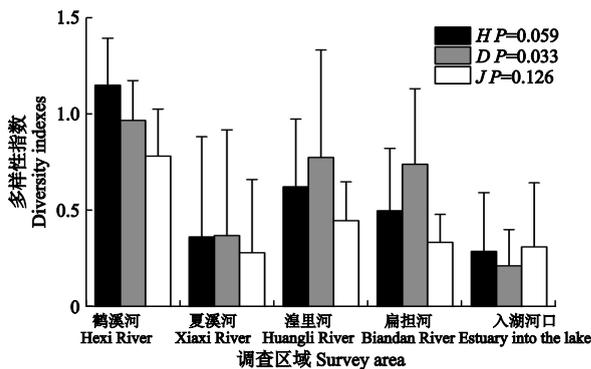


图4 溧湖入湖河流底栖动物生物多样性指数
Fig.4 Biodiversity indices of benthic macroinvertebrates in inflowing rivers of Lake Gehu

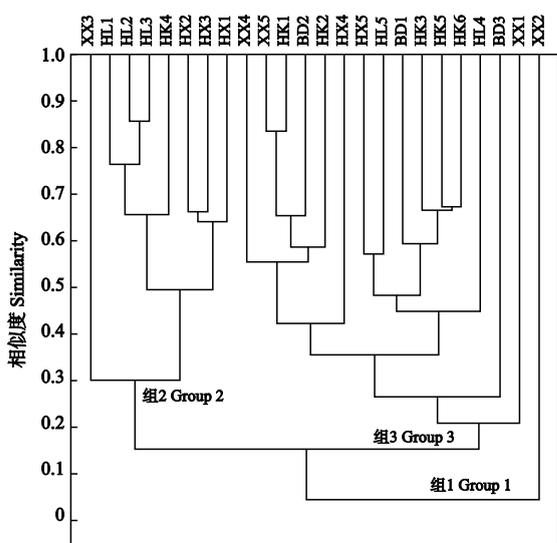


图5 溧湖入湖河流底栖动物聚类分析
Fig.5 Cluster analysis of benthic macroinvertebrates in inflowing rivers of Lake Gehu

中部区域; 组2包括XX3、HX1、HX2、HX3、HL1、HL2、HL3、HK1共8个采样点, 主要分布于鹤溪河、夏溪河及湟里河中上游河段(HK1除外); 组3包括剩余15个剩余采样点, 分布于鹤溪河、夏溪河及湟里河下游河段、河口区域及交汇河流扁担河段(XX1除外), 分组基本以新孟河拓浚工程规划线为界。

聚类分析结果表明, 组1主要优势种为林间环足摇蚊、长角涵螺、龙虱科和秀丽白虾, 其中长角涵螺优势度指数(0.4)最高(表5)。组2优势种为铜锈环棱螺、大沼螺和秀丽白虾, 其中铜锈环棱螺优势度指数(0.71)最高。组3优势种为霍甫水丝蚓和铜锈环棱螺, 霍甫水丝蚓占据绝对优势($Y=0.775$)。

2.2 水环境评价

2.2.1 水体理化特征 表6为聚类的3组区域水体理化参数及营养状态指数, Kruskal-Wallis非参数

表5 各聚类组底栖动物优势物种

Table 5 Dominant species of benthic macroinvertebrates in each cluster group

分组 Groups	优势种 Dominant species	Y 值 Y value
组1 Group 1	林间环足摇蚊 <i>Cricotopus sylvestris</i>	0.200
	长角涵螺 <i>Alocinma longicornis</i>	0.400
	龙虱科 <i>Dytiscidae</i> spp	0.200
	秀丽白虾 <i>Exopalaemon modestus</i>	0.200
组2 Group 2	铜锈环棱螺 <i>Bellamyia aeruginosa</i>	0.710
	大沼螺 <i>Parafossarulus eximius</i>	0.037
	秀丽白虾 <i>Exopalaemon modestus</i>	0.065
组3 Group 3	霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	0.775
	铜锈环棱螺 <i>Bellamyia aeruginosa</i>	0.060

表6 各聚类组水体理化特征

Table 6 Physicochemical characteristics of water bodies in each cluster group

理化参数 Physicochemical parameters	组1 Group 1	组2 Group 2	组3 Group 3	P
TN ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	2.65	2.30	4.03	0.003
TP ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.82	0.13	0.24	0.010
NH_4^+-N ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.40	0.40	1.37	0.004
<i>Chl a</i> ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	4.17	40.2	54.6	0.244
COD_{Mn} ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	5.52	6.00	5.34	0.679
DO ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	10.6	9.07	7.28	0.306
SD (m)	0.18	0.21	0.19	0.166
TSI	65.7	71.0	73.5	0.390

检验结果表明, 各组间 TN、TP 以及 NH_4^+-N 指标具有显著性差异 ($P < 0.05$), 而其他理化因子均无显著性差异 ($P > 0.05$)。TN 变化特征为组3(平均值为 $4.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 显著高于其他组, 而 TP 变化特征为组1(平均值为 $0.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 显著高于其他组, 且组1中 *Chl a* (平均值为 $4.17 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) 明显小于其他两组。结合主成分分析(PCA)可以看出(图6),

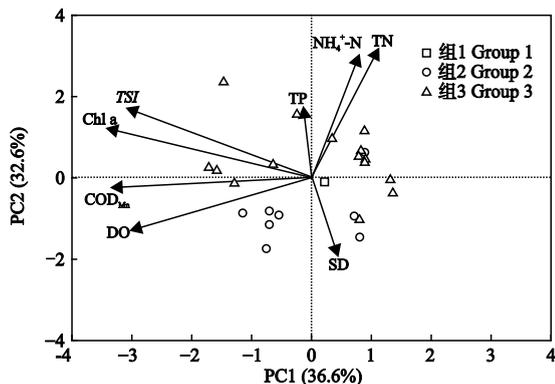


图6 溧湖入湖河流水体理化因子主成分分析
Fig.6 Principal component analysis of physical and chemical factors in inflowing rivers of Lake Gehu

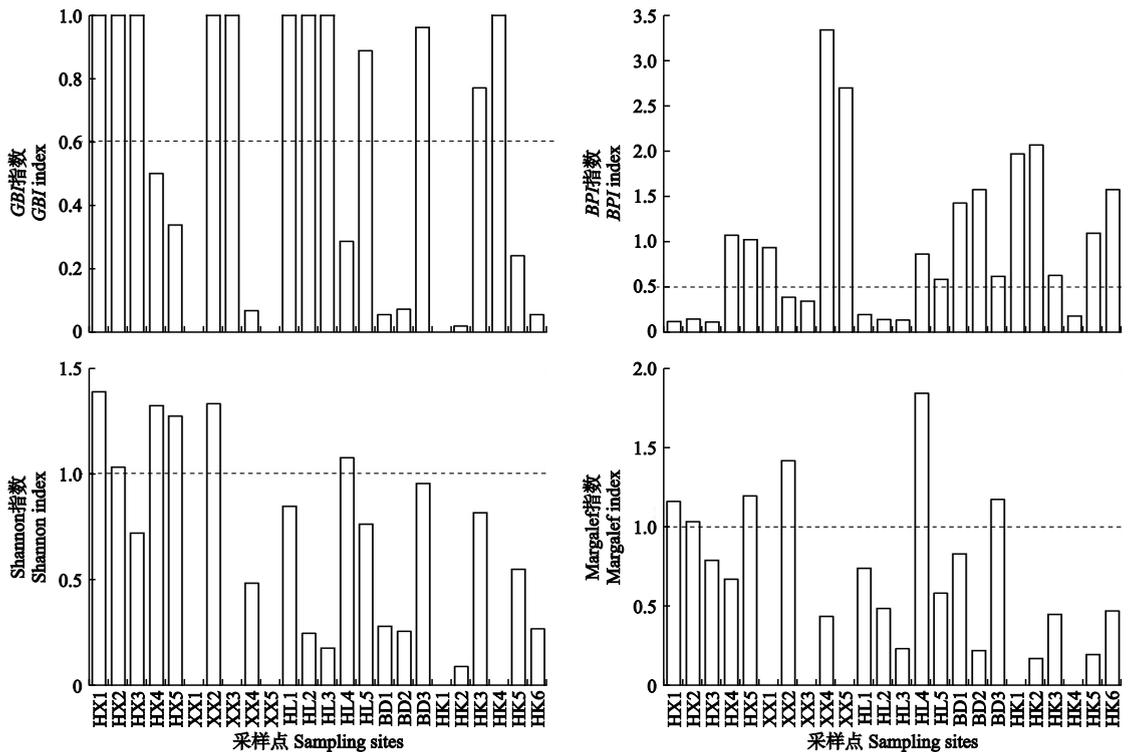


图7 漏湖入湖河流各采样点水质生物学评价

Fig.7 Biological assessment of water quality at different sampling sites in inflowing rivers of Lake Gehu

组3具有较高的营养水平(如 $Chl\ a$ 、TP、TN、 NH_4^+-N 、 TSI),而其他两组营养水平相对较低且物理因子透明度和DO较高。营养状态指数(TSI)计算结果表明组3已处于重度富营养水平,而另外两组也已处于中度富营养水平。

2.2.2 水质生物学评价 利用研究区域24个采样点底栖动物的监测数据,通过4种生物学指数分别对漏湖上游支河进行水质评价,评价等级划分见图7。结果表明:所有监测点中, GBI 指数位于0~1,其中HX4、HX5、HL4、HK5监测点位于0.2~0.6,处于中污染状态,XX1、XX4、XX5、BD1、BD2、HK1、HK2、HK6监测点位于0.2以下,处于重污染状态,其余监测点位于0.6以上,处于轻污染或清洁状态; BPI 指数位于0.12~3.34,与 GBI 指数类似,HX1、HX2、HX3、XX2、XX3、HL1、HL2、HL3、HK4共9个监测点位于0.1~0.5,处于轻污染状态,其余监测点均位于0.5~5,处于中污染状态;Shannon指数处于0~1.39,其中HX1、HX2、HX4、HX5、XX2、HL4监测点位于1~2,处于中污染状态,其余监测点均位于0~1,处于重污染状态;Margalef指数位于0~1.84,与Shannon指数类似,HX1、HX2、HX5、XX2、HL4、BD3位于1~2,处于中污染状态,其余监测点位于1之下,处

于重污染状态。可见,4种生物指数评价结果具有良好的—致性。

3 讨论

3.1 底栖动物群落结构特征及其影响因素

大量研究表明底栖动物群落结构空间分布主要受到底质类型、区域流速以及水生植被等多种因素影响(高欣等,2011;张莹等,2012),而太湖流域底栖动物结构特征的主要影响因素为栖息环境多样性、底质异质性及营养盐浓度(张又等,2015)。本次调查结果表明,漏湖上游各水系间密度和生物量存在一定差异性,密度空间变化趋势为扁担河>入湖河口>鹤溪河>湍里河>夏溪河,生物量空间变化趋势为湍里河>鹤溪河>入湖河口>扁担河>夏溪河。但又存在一定的相似性,采集的28类物种中,以霍甫水丝蚓和铜锈环棱螺占绝对优势。寡毛类颤蚓科耐污性往往较高,常在一些有机废水污染区域占优势,如霍甫水丝蚓最耐有机污染和低氧环境(沈宏等,2016),而环棱螺属往往非常耐受营养盐富集(曹正光等,1998)。

CCA分析可以看出(图8),漏湖入湖河流底栖动物群落结构主要受TN、TP及SD影响,霍甫水丝

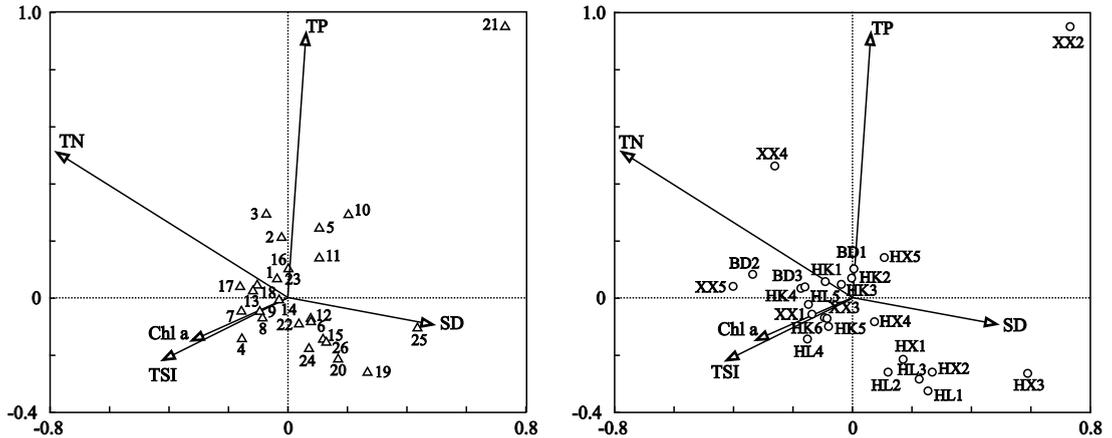


图 8 漏湖入湖河流底栖动物群落与环境因子典范对应分析排序

Fig.8 Redundancy analysis between the communities of benthic macroinvertebrates and environmental factors in inflowing rivers of Lake Gehu

注: 1. 霍甫水丝蚓; 2. 苏氏尾鳃蚓; 3. 羽摇蚊; 4. 中国长足摇蚊; 5. 林间环足摇蚊; 6. 德永雕翅摇蚊; 7. 二叉摇蚊; 8. 前突摇蚊属一种; 9. 铜锈环棱螺; 10. 长角涵螺; 11. 纹沼螺; 12. 大沼螺; 13. 萝卜螺属; 14. 膀胱螺属一种; 15. 圆顶珠蚌; 16. 椭圆背角无齿蚌; 17. 淡水壳菜; 18. 河蚬; 19. 春蜓科; 20. 负子蝾科; 21. 龙虱科; 22. 中国淡水蛭; 23. 舌蛭属; 24. 日本沼虾; 25. 秀丽白虾; 26. 米虾属。

Note: 1. *Limnodrilus hoffmeisteri*; 2. *Branchiura sowerbyi*; 3. *Chironomus plumosus*; 4. *Tanytus chinensis*; 5. *Cricotopus sylvestris*; 6. *Glyptotendipes tokunagai*; 7. *Dicotendipes* sp. 8. *Procladius* sp.; 9. *Bellamyia aeruginosa*; 10. *Alocinma longicornis*; 11. *Parafossarulus striatulus*; 12. *Parafossarulus eximius*; 13. *Radix* sp.; 14. *Physa* sp.; 15. *Unio douglasiae*; 16. *Anodonta woodiana elliptica*; 17. *Limnoperna fortunei*; 18. *Corbicula fluminea*; 19. Gomphidae; 20. Belostomatidae; 21. Dytiscidae spp; 22. *Novaculina chinensis*; 23. *Glossiphonia* sp.; 24. *Macrobrachium nipponense*; 25. *Exopalaemon modestus*; 26. *Caridina* sp.

蚓分布主要受到 TN 和 TP 影响,铜锈环棱螺则与 TSI 指数及 Chl a 显著正相关,而 SD 主导了甲壳类分布。夏溪河底栖动物密度及生物量均最低,优势物种并未包括铜锈环棱螺,这与其沿岸水草分布较少及水体污染程度高有关,软体动物生境条件受到限制,尤其是下游 (XX4,XX5),受到硬质岸堤及人类活动干扰程度较高。鹤溪河及湟里河物种最多,密度与生物量也较大,与其丰富的水生植被覆盖相关,增强了栖境多样性,且沿途大多未通航,水体透明度较高,满足部分底栖动物的栖息条件。扁担河及入湖河段作为三河交汇河流,流速大幅增加,河床底质不稳定,导致有机质不易集聚,难以为底栖动物提供良好的栖息地 (吴召仕等, 2011),不利于软体动物类栖息。扁担河霍甫水丝蚓平均密度达 $466.7 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$,最高值达 $1306.7 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$,但铜锈环棱螺密度则大幅下降,因此生物量大幅下降。而河口区域受到河道展宽及漏湖的顶托作用,浅滩较多,上游下泄水体中大量有机质及污染物质沉积在此区域,以耐污种霍甫水丝蚓为绝对优势种。随着有机质的增加,大个体逐渐被小个体替代,因为小个体的种类多为机会种,一般具有较短的生活年限,因此对环境的适应能力较强 (Warwick *et al.*, 1986)。

有明显的空间分布特征,以新孟河延伸拓浚工程线为界,在鹤溪河、夏溪河、湟里河中上游河段由于受到人类干扰较小,加之两岸自然条件良好,底栖动物生物量较大,以铜锈环棱螺和秀丽白虾为优势物种,而下游河段、扁担河段及河口区域,受沿途工厂及居民区影响较大,以耐污种霍甫水丝蚓和铜锈环棱螺为优势种,密度也较大。

水域生态环境状况的空间差异及水域生境的复杂程度决定了底栖动物群落的多样性 (赵瑞等, 2019)。Shannon 多样性指数、Margalef 丰富度指数以及 Pielou 均匀度指数可反映底栖动物多样性,同时可监测水生态环境变化与底栖动物群落结构的响应关系 (Levine *et al.*, 2009; 蔡永久等, 2010)。水生植被对底栖动物群落结构的构建有重要作用,可为底栖动物提供生活空间,也可以吸收和消耗水体中的营养物质,使得水体营养盐浓度降低 (Takamura *et al.*, 2003; 向速林等, 2014)。3 种多样性指数在不同区域波动性较大,但趋势一致,其中以鹤溪河生物多样性指数最高,湟里河及扁担河生物多样性指数居中,而夏溪河及河口生物多样性指数最低。调查发现 (表 1),在鹤溪河、夏溪河及湟里河中上游河段,底质多为泥质,几乎不通航,且水生植被盖度较大,主要有芦苇、菖蒲、菹草等,此区域的软体动物和节

聚类分组结果表明,漏湖入湖河流底栖动物具

肢动物密度较高。而中下游主要为硬质岸堤,部分甚至多沙石,水生植被密度较小,船舶、城镇、工厂排污较多,仅有少量的菹草和芦苇分布,喜欢水草的软体动物和节肢动物密度较低。因此水生植物的分布也可能是影响漏湖上游支河底栖动物多样性差异的重要因素。这种现象表明,底栖动物更适宜在鹤溪河及湍里河这种水草植被丰富、低流速且少人类干扰的生境条件下生存和繁殖,而夏溪河、湍里河中下游受到居民区及工厂影响较大,交汇河流扁担河流速大幅增加,水生植被的减少及沿河两岸岸堤的硬质化导致生物多样性有所下降,夏溪河下游及河口区域受到污染最为严重,水体高度富营养化使得生物多样性最低。但漏湖入湖河流生物多样性差异并不显著,尽管生物量具有显著性差异,这可能是由于软体动物中螺类占比较多的缘故。

3.2 漏湖入湖河流水质生物学评价

对比分析各环境因子的空间分布特征,不同区域主要反映了营养盐的显著差异性。富营养化严重水体往往会分布大量霍甫水丝蚓,由于该种类能够耐受有机物分解时造成的低氧甚至缺氧环境,而其他底栖动物在这种生境下则受到抑制(Chapman *et al.*, 1982)。而环棱螺属种类耐污能力也较强,对污染敏感度较低,能栖息于多污性和中污性水体(蔡永久等, 2014)。漏湖上游支河总体优势种以耐污程度较高的霍甫水丝蚓和铜锈环棱螺为主,尤其是在夏溪河下游,只有霍甫水丝蚓为优势物种。利用 *TSI* 指数对漏湖上游支河不同区域水质营养水平进行评价,各区域具有一定的空间差异。鹤溪河、夏溪河及湍里河中上游基本处于中度富营养水平,而下游河段、河口、扁担河则处于重度富营养水平。本研究利用 *GBI* 指数、*BPI* 指数、Shannon 多样性指数和 Margalef 丰富度指数对新孟河流域水质进行评价,4种评价指数评价结果与 *TSI* 指数评价具有良好的一致性,表明以新孟河延伸拓浚工程线为界,鹤溪河、夏溪河、湍里河中上游河段水质处于轻-中污染状态,而下游河段、扁担河段及河口区域水质处于中-重污染状态。根据吴召仕等(2011)对太湖流域主要河流水质评价表明,洮漏水系水质次于苕溪水系而好于沿江水系,处于中污染状态,这与本文漏湖入湖河流整体生物评价结果基本一致。鉴于评价结果与各水系密度和生物量在一定程度上表现出一致性,可以看出底栖动物群落结构特征变化良好地反映了水体生态系统的健康水平,表明漏湖上游河网

现阶段水环境保护工作有待进一步提升。根据 CCA 分析,应当严格控制各水系尤其是下游河段沿岸生活污水和工业废水等污染物的排放,以减少水体 TN 和 TP 含量,未来应当利用更为详尽的底栖动物监测数据为新孟河沿线河网水环境治理提供依据。

致 谢 感谢江苏省太湖治理工程建设管理局、南京水利科学研究所和江苏省水利工程建设局在野外采样中的支持和帮助。

参考文献

- 包先明, 晁建颖, 尹洪斌. 2016. 太湖流域漏湖底泥重金属赋存特征及其生物有效性. *湖泊科学*, **28**(5): 1010-1017. [Bao XM, Chao JY, Yin HB. 2016. Occurrence characteristics and bioavailability of heavy metals in surface sediments of Lake Gehu, Taihu Basin. *Journal of Lake Sciences*, **28**(5): 1010-1017.]
- 曹正光, 蒋忻坡. 1998. 几种环境因子对梨形环棱螺的影响. *上海海洋大学学报*, **7**(3): 200-205. [Cao ZG, Jiang XP. 1998. The influence of environmental factors on *Bellamyia purificata*. *Journal of Shanghai Fisheries University*, **7**(3): 200-205.]
- 池仕运, 彭建华, 万成炎, 等. 2009. 湖北省三道河水库底栖动物的初步研究. *湖泊科学*, **21**(5): 705-712. [Chi SY, Peng JH, Wan CY, *et al.* 2009. Preliminary study on macrozoobenthos of Sandaohu Reservoir, Hubei Province. *Journal of Lake Sciences*, **21**(5): 705-712.]
- 蔡庆华, 刘建康, King L. 2002. 评价湖泊富营养化的一个综合模型. *应用生态学报*, **13**(12): 1674-1678. [Cai QH, Liu JK, King L. 2002. A comprehensive model for assessing lake eutrophication. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **13**(12): 1674-1678.]
- 蔡永久, 龚志军, 秦伯强. 2010. 太湖大型底栖动物群落结构及多样性. *生物多样性*, **18**(1): 50-59. [Cai YJ, Gong ZJ, Qin BQ. 2010. Community structure and diversity of macrozoobenthos in Lake Taihu, a large shallow eutrophic lake in China. *Biodiversity Science*, **18**(1): 50-59.]
- 蔡永久, 姜家虎, 张 路, 等. 2010. 长江中下游湖泊大型底栖动物群落结构及多样性. *湖泊科学*, **22**(6): 811-819. [Cai YJ, Jiang JH, Zhang L, *et al.* 2010. Community structure and biodiversity of macrozoobenthos of typical lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Journal of Lake Sciences*, **22**(6): 811-819.]
- 蔡永久, 刘劲松, 戴小琳, 等. 2014. 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*, **33**(5): 1224-1232. [Cai YJ, Liu JS, Dai XL, *et al.* 2014. Community structure of macrozoobenthos and bioassessment of water quality in Lake Changdang, Jiangsu Province. *Chinese Journal of Ecology*, **33**(5): 1224-1232.]
- 丁建华, 周立志, 邓道贵. 2017. 淮河干流大型底栖动物群落结构及水质生物学评价. *长江流域资源与环境*,

- 26(11): 157-165. [Ding JH, Zhou LZ, Deng DG. 2017. Community structure of macrozoobenthos and biological evaluation of water quality in the mainstream of Huai River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 26(11): 157-165.]
- 丁轶睿, 李定龙, 张毅敏, 等. 2017. 漏湖底泥细菌群落结构及多样性. *环境科学学报*, 37(5): 1649-1653. [Ding YR, Li DL, Zhang YM, et al. 2017. The structure and the diversity of sediment microbial communities in Gehu Lake. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 37(5): 1649-1653.]
- 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编辑委员会. 2002. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 784. [Editorial Committee of water and waste water monitoring and analysis method of State Environmental Protection Administration. 2002. Water and waste water monitoring and analysis method (fourth edition). Beijing: China Environmental Science Press, 784.]
- 高 欣, 牛翠娟, 胡忠军. 2011. 太湖流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系. *应用生态学报*, 22(12): 3329-3336. [Gao X, Niu CJ, Hu ZJ. 2011. Macrozoobenthos community structure and its relations with environmental factors in Taihu River basin. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22(12): 3329-3336.]
- 桂 青. 2016. 新孟河延伸拓浚工程对长江水环境影响研究. *人民长江*, 47(19): 20-25. [Gui Q. 2016. Research on influence of Ximeng River dredging and extending project on water environment of Yangtze River. *Yangtze River*, 47(19): 20-25.]
- 马秀娟, 沈建忠, 孙金辉, 等. 2012. 天津于桥水库大型底栖动物群落结构及其水质生物学评价. *生态学杂志*, 31(9): 2356-2364. [Ma XJ, Shen JZ, Sun JH, et al. 2012. Macrozoobenthos community structure and water quality evaluation of Yuqiao Reservoir in Tianjin, North China. *Chinese Journal of Ecology*, 31(9): 2356-2364.]
- 潘保柱, 王兆印, 余国安. 2012. 长江源和黄河源的大型底栖动物群落特征研究. *长江流域资源与环境*, 21(3): 369-374. [Pan BZ, Wang ZY, Yu GA. 2012. Assemblage characteristics of macrozoobenthos in the source region of the Yangtze River and the source region of the yellow river. *Resources and environment in the Yangtze Basin*, 21(3): 369-374.]
- 沈 宏, 石彭灵, 吴 耀, 等. 2016. 梁塘河大型底栖动物群落及其水质生物学评价. *水生生物学报*, 40(1): 203-210. [Shen H, Shi PL, Wu Y, et al. 2016. Macrozoobenthos community structure and water quality bioassessment of the Liangtang River. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 40(1): 203-210.]
- 王俊才, 王新华. 2011. 中国北方摇蚊幼虫. 北京: 中国言实出版社. [Wang JC, Wang XH. 2011. *Chironomus plumosus* in northern China. Beijing: Yanshi Press in China.]
- 王伟莉, 闫振广, 何 丽, 等. 2013. 五种底栖动物对优控污染物的敏感性评价. *中国环境科学*, 33(10): 1856-1862. [Wang WL, Yan ZG, He L, et al. 2013. Sensitivity evaluation of five zoobenthos to priority pollutants. *China Environmental Science*, 33(10): 1856-1862.]
- 汪兴中, 邹 霞, 刘 忱, 等. 2018. 东茗溪下游底栖动物群落结构及其水质生物学评价. *湖州师范学院学报*, 40(2): 21-27. [Wang XZ, Zou X, Liu C, et al. 2018. Community structure of macroinvertebrate and water quality bioassessment in the downstream of the east Tiaoxi River. *Journal of Huzhou University*, 40(2): 21-27.]
- 魏云慧, 肖 红, 包 军, 等. 2006. 大庆市红旗水库的底栖动物与水质评价. *黑龙江环境通报*, 30(4): 69-71. [Wei YH, Xiao H, Bao J, et al. 2006. Benthic and water quality evaluation of Hongqi Reservoir in Daqing City. *Heilongjiang Environment Journal*, 30(4): 69-71.]
- 吴召仕, 蔡永久, 陈宇炜, 等. 2011. 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. *湖泊科学*, 23(5): 686-694. [Wu ZS, Cai YJ, Chen YW, et al. 2011. Assemblage structure investigation of macrozoobenthos and water quality bioassessment of the main river systems in Taihu Basin. *Journal of Lake Sciences*, 23(5): 686-694.]
- 向速林, 朱梦圆, 朱广伟, 等. 2014. 太湖东部湖湾大型水生植物分布对水质的影响. *中国环境科学*, 34(11): 2881-2887. [Xiang SL, Zhu MY, Zhu GW, et al. 2014. Influence of macrophytes on water quality in the eastern bays of Lake Taihu, China. *China Environmental Science*, 34(11): 2881-2887.]
- 闫红飞. 2015. 新孟河延伸拓浚工程对漏湖水量水质影响研究. *水利水电技术*, 46(4): 35-38. [Yan HF. 2015. Impact from New Menghe River Extending and Dredging Project on water quantity and quality of Gehu Lake. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 46(4): 35-38.]
- 杨 洋, 张 玮, 潘宏博, 等. 2017. 漏湖轮虫群落结构及其与水环境因子的关系. *长江流域资源与环境*, 26(6): 832-840. [Yang Y, Zhang W, Pan HB, et al. 2017. Community structure of rotifers in relation to environmental factors in lake Gehu. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 26(6): 832-840.]
- 张 又, 刘 凌, 蔡永久, 等. 2015. 太湖流域河流及溪流大型底栖动物群落结构及影响因素. *中国环境科学*, 35(5): 1535-1546. [Zhang Y, Liu L, Cai YJ, et al. 2015. Benthic macroinvertebrate community structure in rivers and streams of Lake Taihu Basin and environmental determinants. *China Environmental Science*, 35(5): 1535-1546.]
- 张宇航, 彭文启, 刘培斌, 等. 2019. 永定河流域春季大型底栖动物群落结构和空间格局. *中国环境监测*, 35(4): 31-38. [Zhang YH, Peng WQ, Liu PB, et al. 2019. Study on the community structure and spatial pattern of macroinvertebrate in the Yongding River basin in spring. *Environmental Monitoring in China*, 35(4): 31-38.]
- 张 莹, 吕振波, 徐宗法, 等. 2012. 环境污染对小清河口大型底栖动物多样性的影响. *生态学杂志*, 31(2): 381-387. [Zhang Y, Lv ZB, Xu ZF, et al. 2012. Impacts of environmental pollution on macrozoobenthos diversity in Xiaqing estuary of Shandong Province, East China. *Chinese*

- Journal of Ecology*, **31**(2): 381–387.]
- 赵 瑞, 赵学敏, 苟 婷, 等. 2019. 广西贝江大型底栖动物群落结构时空分布特征. *中国环境监测*, **35**(4): 40–49. [Zhao R, Zhao XM, Gou T, *et al.* 2019. Spatial and temporal distributions of macroinvertebrate communities in the Beijiang River, Guangxi. *Environmental Monitoring in China*, **35**(4): 40–49.]
- Covich AP, Palmer MA, Crowl TA. 1999. The role of benthic invertebrate species in freshwater ecosystems: Zoobenthic species influence energy flows and nutrient cycling. *BioScience*, **49**: 119–127.
- Chapman PM, Farrell MA, Brinkhurst RO. 1982. Effects of species interactions on the survival and respiration of *Limnodrilus hoffmeisteri* and *Tubifex tubifex* (Oligochaeta, Tubificidae) exposed to various pollutants and environmental factors. *Water Research*, **16**: 1405–1408.
- Epler JH. 2001. Identification manual for the larval Chironomidae (Diptera) of North and South Carolina. EPA; Human Health and Ecological Criteria Division.
- Lampitt RS, Wishner KF, Turley CM, *et al.* 1993. Marine snow studies in the Northeast Atlantic Ocean: Distribution, composition and role as a food source for migrating plankton. *Marine Biology*, **116**: 689–702.
- Levine JM, Hililerislambers J. 2009. The importance of niches for the maintenance of species diversity. *Nature*, **461**: 254–257.
- Margalef DR. 1957. Information theory in ecology. *General Systems*, **3**: 36–71.
- Morse JC, Yang LF, Tian LX. 1994. Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality. Nanjing: Hohai University Press.
- Pielou EC, Levandowsky M. 1975. Ecological diversity. *Quarterly Review of Biology*, **34**: 1–16.
- Spellerberg IF, Fedor PJ. 2003. A tribute to Claude Shannon (1916–2001) and a plea for more rigorous use of species richness, species diversity and the ‘Shannon-Wiener’ Index. *Global ecology and biogeography*, **12**: 177–179.
- Takamura N, Kadono Y, Fukushima M, *et al.* 2003. Effects of aquatic macrophytes on water quality and phytoplankton communities in shallow lakes. *Ecological Research*, **18**: 381–395.
- Thomas JD. 1990. Mutualistic interactions in fresh water modular systems with molluscan components. *Advances in Ecological Research*, **20**: 125–178.
- Thorne RS, Williams WP. 1997. The response of benthic macroinvertebrate to pollution in developing countries: A multimetric system of bioassessment. *Freshwater Biology*, **37**: 671–686.
- Wang XZ, Tan X. 2017. Macroinvertebrate community in relation to water quality and riparian land use in a subtropical mountain stream, China. *Environmental Science & Pollution Research*, **24**: 14682–14689.
- Warwick RM, Collins NR, Gee JM, *et al.* 1986. Species size distributions of benthic and pelagic metazoa: Evidence for interaction. *Marine Ecology Progress Series*, **34**: 63–68.

作者简介 邵 勇,男,1979年生,高工,主要从事水工结构研究。E-mail: 46875561@qq.com

责任编辑 李凤芹
