#### DOI: 10.5846/stxb202202060299

贺湛斐,童春富.太浦河大型底栖动物群落组成及时空分布特征.生态学报,2023,43(11):4619-4631. He Z F, Tong C F. Community composition and spatio-temporal distribution characteristics of benthic macroinvertebrates in Taipu River. Acta Ecologica Sinica,2023,43(11):4619-4631.

# 太浦河大型底栖动物群落组成及时空分布特征

贺湛斐<sup>1,2</sup>,童春富<sup>1,2,\*</sup>

1 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室,上海 200241 2 崇明生态研究院,上海 202162

摘要:太浦河连接东太湖和黄浦江,是东太湖向下游行洪的主河道,也是黄浦江上游重要的引水水源。分别于 2017 年 10 月、 12 月和 2018 年 3 月、6 月在太浦河沿程设置的 5 个站点开展了大型底栖动物季节频次的取样调研,分析了太浦河大型底栖动 物群落的结构特征及其主要影响因子。调查期间共采集到大型底栖动物 25 种,隶属于 3 门 6 纲 14 科,其中以河蚬(Corbicula fluminea)为代表的双壳类和以铜锈环棱螺(Bellamya aeruginosa)为代表的腹足类处优势地位。太浦河大型底栖动物群落的密 度、生物量及多样性特征在不同站点间均存在显著差异(P<0.05);而在不同季节间均不存在显著差异(P>0.05)。聚类排序分 析表明,太浦河大型底栖动物群落在空间上的差异较季节间的变化更为明显。太浦河大型底栖动物群落的物种组成特征与太 浦河、东太湖的水文连通格局密切相关;而沿程不同程度人为干扰下的水体营养水平以及底质类型与生境异质性等生境条件对 太浦河大型底栖动物群落的分布特征具有重要影响,其综合作用机理有待进一步研究。 关键词;太浦河;大型底栖动物;群落结构;生境条件

# Community composition and spatio-temporal distribution characteristics of benthic macroinvertebrates in Taipu River

HE Zhanfei<sup>1,2</sup>, TONG Chunfu<sup>1,2,\*</sup>

State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China
 Institute of Eco-Chongming, Shanghai 202162, China

Abstract: Taipu River connects East Taihu Lake and Huangpu River. It is the main channel for flood discharge from East Taihu Lake to the downstream, and also the important water supply source for the upper reaches of Huangpu River. We set five fixed sampling sites along the Taipu River and carried out seasonal surveys from October 2017 to June 2018. Community structure of benthic macroinvertebrates and corresponding influential factors were analyzed based on these surveys. A total of 25 species of benthic macroinvertebrates were collected, belonging to 3 phyla, 6 classes, and 14 families. Among these assemblages, bivalves represented by *Corbicula fluminea* and gastropods represented by *Bellamya aeruginosa* were the dominant groups. The significant differences (P < 0.05) were found in the abundance, biomass and diversity of benthic macroinvertebrates between the different sites, but not between the different seasons (P > 0.05). Cluster and NMDS analysis showed that the difference between the sampling sites was more obvious than that between the sampling seasons to benthic macroinvertebrates. The species composition characteristics of the benthic macroinvertebrates in the Taipu River were closely related to the hydrological connectivity to the East Taihu Lake. The distribution characteristics of the benthic macroinvertebrates along the Taipu River were greatly affected by human disturbance and habitat conditions such as water nutrient level, substrate type and habitat heterogeneity, etc. The interaction mechanisms among them need further studies.

基金项目:上海市科学技术委员会项目(19DZ1203801);国家自然科学基金项目(U2040202)

收稿日期:2022-02-06; 网络出版日期:2023-02-07

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: cftong@ sklec.ecnu.edu.cn

#### Key Words: Taipu River; benthic macroinvertebrate; community structure; habitat conditions

底栖动物生活史的全部或部分时间都生活在水体底部,是河流生态系统中不可或缺的重要部分。其广泛的分布范围,多样的摄食及生活方式,较长的生命周期和有限的迁移能力,使其受生存环境的深刻影响,其群落结构方面的特征能够在一定程度上反映水环境状况<sup>[1]</sup>。目前,与河流相关的大型底栖动物群落研究主要集中在群落结构及其与环境因子之间的关系<sup>[2-4]</sup>,物种的组成与分布对环境污染及闸坝、航运等干扰的指示与响应<sup>[5-9]</sup>,以及与功能群相关的研究等方面<sup>[10-13]</sup>。

太浦河连接东太湖和黄浦江。2016 年底,位于太浦河北岸的金泽水库实现通水;水库直接从太浦河干流 取水,总库容约910万m<sup>3</sup>,应急备用库容约525万m<sup>3</sup>,主要为上海市西南五区约670万居民供水<sup>[14]</sup>,这使得 太浦河成为黄浦江上游重要的水源地。目前,太湖流域已有较多关于大型底栖动物群落结构及影响因素等方 面的研究<sup>[3,15–17]</sup>,但其中专门针对水源地太浦河这一典型出湖河流的研究还鲜见报道。本文以太浦河为研 究区域,分析了沿程大型底栖动物的群落组成及其时空分布特征,同时探讨了生境条件对太浦河大型底栖动 物群落结构的影响,在丰富河流大型底栖动物研究的同时,可以为区域水环境保护、水质安全保障提供科学 依据。

# 1 材料及方法

## 1.1 区域概况及站点设置

太浦河是 20 世纪 50—90 年代在天然湖荡的基础上人工分多次开挖连接,引水东太湖形成的半自然河流,沿途流经江苏省、浙江省和上海市,全长 57.6km<sup>[18]</sup>。河流地处太湖流域东部平原区,属亚热带季风气候, 年均气温为 15.5℃,年均降水量约为 1177mm<sup>[19]</sup>。本研究采样调查横跨的 2017 及 2018 两个年度的太湖流域 汛情均总体平稳<sup>[20-21]</sup>,且各年份下的流域年降水量与太浦河全年期水质亦基本类似,无明显年度差异<sup>[22-23]</sup>。 作为黄浦江上游水系的组成部分,太浦河承担着防洪排涝、航运供水等重要功能;其水质受到太湖下泄径流、 两岸支流湖荡汇水以及沿程生产生活污废排放等多重影响,水源地安全已引起较多关注<sup>[19,24-25]</sup>。已有研究 显示太浦河河段水质具有明显的空间分异特征,整体上主要为上游水质优于下游而中游河段相对最差,表现 在水体富营养化以及石油类污染等方面<sup>[26-27]</sup>。本研究结合实地情况将站点间隔适当距离分别布设在太浦闸 (即东太湖与太浦河连接处)与金泽水库取水口之间的太浦河干流河段,沿流程分别为 T1(太浦闸水文站)、 T2(平望大桥)、T3(黎里东大桥)、T4(芦墟大桥)以及 T5(金泽水文站)共 5 个采样站点,如图 1 所示。

# 1.2 样品的采集与处理

分别于 2017 年秋季(10月)、冬季(12月)、2018 年春季(3月)、夏季(6月)四个季节进行大型底栖动物 的取样调研。每次采样时,使用 1/16m<sup>2</sup>彼得逊采泥器在每个站点采集 5 个平行样本,用 0.5mm 孔径的网筛进 行淘洗,拣取大型底栖动物。所有样品用 75%乙醇溶液固定,使用解剖镜及显微镜进行分类鉴定并计数,样 品尽量鉴定到种或属;后于 60℃下烘干至恒重,称取生物量干重(精确至 0.0001g)。其中软体动物未进行去 壳处理。

# 1.3 数据处理

采用相对多度(%N)、相对生物量(%B)、相对频度(%FO)<sup>[28]</sup>和 Pinkas 相对重要性指数(IRI)<sup>[29]</sup>来反映 群落的组成特征,并用 IRI 值作为物种优势度的表征<sup>[30]</sup>,以 IRI>20 作为主要优势种的判定依据<sup>[30–31]</sup>。

利用 PRIMER 5.2.8 计算 Margalef 物种丰富度指数(D)、Shannon-Wiener 多样性指数(H')和 Pielou 均匀 度指数(J')来测度分析大型底栖动物群落的物种多样性<sup>[32–33]</sup>。

相对多度:	$\%N = \frac{n_i}{N} \times 100$
相对生物量:	$\%B = \frac{b_i}{B} \times 100$

http://www.ecologica.cn



120°40′E

0 10 km

#### 图1 太浦河采样站点分布图

#### Fig.1 Location map of sampling sites in Taipu River

T1:太浦闸水文站 Taipu Water Gate Hydrologic Station; T2:平望大桥 Pingwang Bridge; T3:黎里东大桥 Lilidong Bridge; T4:芦墟大桥 Luxu Bridge; T5:金泽水文站 Jinze Hydrologic Station

相对频度: 
$$%FO = \frac{f_i}{F} \times 100$$

相对重要性指数: IRI = 
$$(\%N + \%B) \times \frac{f_i}{F}$$

10 km

Margalef 物种丰富度指数:

Shannon-Wiener 多样性指数:

Pielou 均匀度指数: 
$$J' = \frac{H'}{\ln S}$$

式中,  $n_i$ 为第 i种的个体数;  $b_i$ 为第 i种的生物量;  $f_i$ 为第 i种的出现次数; N为总个体数; B为总生物量; F为 总调研次数; S为物种数;  $P_i$ 为第 i种的个体数占总个体数的比例,  $P_i = \frac{n_i}{N}$ 。

 $H' = -\sum_{i} P_{i} \ln P_{i}$ 

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

利用 SPSS 采用单因素方差分析(One-way ANOVA)研究不同季节以及不同站点间大型底栖动物群落的密度、生物量与物种多样性指数的差异;在此基础上,应用最小显著差法(LSD 法)进行组间的多重比较,以分析不同站点或季节两两之间的差异,以 P<0.05 表示显著差异<sup>[34]</sup>。若数据不满足方差分析的正态分布或方差齐性要求,则采用 Kruskal-Wallis 非参数检验方法<sup>[17,35–36]</sup>。

利用 PRIMER 5.2.8 进行等级聚类(Cluster)和非度量多维标度(NMDS)排序,分析不同站点不同季节底 栖动物群落组成的相似性<sup>[30,32,34,37–38]</sup>。相应物种的多度数据经过二次方根变换后,计算 Bray-Curtis 相似性系数,进而构建相似性矩阵;在此基础上进行群落的聚类和排序分析<sup>[38]</sup>。用胁强系数(Stress)来判断 NMDS 分析结果的可信度:0<Stress<0.01,完全可信;0.01<Stress<0.05,可信的;0.05<Stress<0.1,基本可信;0.1<Stress<0.2,有一定参考价值;0.2<Stress<0.3,不可信<sup>[39]</sup>。同时绘制丰度-生物量比较曲线(ABC 曲线),分析各站点大

型底栖动物群落所受到的环境干扰情况<sup>[16,40-41]</sup>;使用描述曲线分离程度和方向的单一统计量——分离系数 W 来表征群落受到的干扰程度,计算公式如下:

$$W = \sum_{i=1}^{s} \frac{(B_i - A_i)}{50(S - 1)}$$

式中,  $B_i$ 和 $A_i$ 分别对应 ABC 曲线中第i个物种的生物量和丰度的累积百分比, S为出现的物种数<sup>[42]</sup>。在受 干扰较小群落较为稳定的状态下, 生物量曲线基本高于丰度曲线, W > 0, 且 W越大两曲线分离得越好, 表明 受干扰程度越小; 反之, 当群落受到较为严重的干扰时, 丰度曲线基本在生物量曲线之上, W < 0, 且 W越小两 曲线分离得越好, 表明受干扰程度越大; 而当群落受到中等程度的干扰时, 两条曲线相交或重叠, W 接近 于  $0^{[40,43]}$ 。

# 2 结果

# 2.1 种类组成与优势种分布

调查期间共鉴定出大型底栖动物 25 种,分属 3 门 6 纲 11 目 14 科,种类组成以软体动物为主。其中双壳 类 10 种,占总物种数的 40%;腹足类 7 种,占总物种数的 28%;寡毛类和软甲类各 3 种,均占总物种数的 12%;还有摇蚊幼虫和蛭类各 1 种,均占总物种数的 4%。

不同站点大型底栖动物群落组成特征见表 1。在 T1 站点铜锈环棱螺(Bellamya aeruginosa)和背瘤丽蚌(Lamprotula leai)是主要优势种(IRI > 20),其中前者的相对多度(58.93%)与后者的相对生物量(37.23%)均为站点最高值;此外,圆顶珠蚌(Unio douglasiae)有一定优势度(10<IRI<20),长角涵螺(Alocinma longicornis)、河蚬(Corbicula fluminea)等也较为常见(1<IRI<10)。随着河流向东延伸,在 T2、T3 站点河蚬的相对多度(60.00%、63.61%)、相对生物量(55.80%、59.03%)与优势度(28.95、30.66)不断增加且各自均为各站点最高,成为两站点最主要的优势种;而铜锈环棱螺在 T2、T3 站点的优势度(18.35、25.99)则较 T1 站点(79.14)有明显下降,此外在 T2 站点未出现的霍甫水丝蚓(Limnodrilus hoffmeisteri)在 T3 站点的相对多度(8.50%)与优势度(1.28)也有所增加。至 T4 站点,河蚬升至全河段所有物种优势度的最高值(181.25),成为 T4 的绝对优势种;铜锈环棱螺则降至消失。霍甫水丝蚓在 T4 的相对多度(12.69%)和优势度(2.54)进一步增加,至 T5 站点分别达到 32.86%和 11.51,和优势度骤降的河蚬(17.73)与优势度回升的铜锈环棱螺(11.93)一同成为 T5 有一定优势的物种;同时方格短沟蜷(Semisulcospira cancellata)、纹沼螺(Parafossarulus striatulus)和长角涵螺也在 T5 较为常见。

## 2.2 密度及生物量

太浦河大型底栖动物群落的密度和生物量全河段均值在各季节间都表现出春季>夏季>冬季>秋季,但二 者在各季节间的差异均不显著(P>0.05),且不同季节之间亦不存在显著差异,如图 2 所示。而太浦河大型底 栖动物群落的密度和生物量全年均值在各站点间整体都表现出显著的差异性(P<0.05),且不同站点两两之 间差异有所不同,表现为 T1 与 T4 站点的密度及生物量均显著高于其余各站点(P<0.05),如图 3 所示;在沿 流程随站点变化的趋势上密度和生物量二者也是一致的,均自 T1 至 T2 站点显著下降,至 T3 站点有所回升, 在 T4 站点显著增加至全河段最高后,又于 T5 站点显著降低。

不同站点不同季节大型底栖动物群落的密度和生物量变化特征如图 4 所示。从同一站点、不同季节对比 来看,在T3 站点春季的密度显著高于秋冬两季(P<0.05),同时该站点在春季的生物量也显著高于其它三个 季节(P<0.05);除此之外其余站点的密度与生物量各自在四季间均不存在显著的差异(P>0.05)。从同一季 节、不同站点对比来看,在密度方面,除春季各站点间不存在显著差异(P>0.05)外,秋冬夏三个季节各自在不 同站点间均存在显著的差异(P<0.05)。其中,在秋季 T1 站点的密度显著高于 T3 与 T5 站点(P<0.05)。冬季 T4 站点密度显著高于 T2 与 T3 站点(P<0.05);而 T3 站点密度则显著低于 T4 与 T1 站点(P<0.05)。夏季 T4 11 期

Table 1 Characteristics of benthic macroinvertebrate assemblages in the different sampling sites along the Taipu River

太浦河不同站点大型底栖动物群落组成特征

表 1

T1;太浦闸水文站 Taipu Water Gate Hydrologic Station;T2;平望大桥 Pingwang Bridge;T3;黎里东大桥 Lilidong Bridge;T4;芦墟大桥 Luxu Bridge;T5;金泽水文站 Jinze Hydrologic Station;% N;相对多度 3.26 0.00 0.00 0.16 0.00 0.00 0.00 0.00 17.73 0.00 0.14 0.00 0.00 0.0 0.95 0.00 1.980.00 7.68 0.0 0.00 1.93 2.34 1.46 3.84 0.00 0.07 0.18 0.07 0.07 IRI 1.51 % FO0.0035.00 0.00 5.000.00 0.00 0.00 5.000.00 13.57 30.00 0.00 0.00 30.00 20.000.00 0.00 3.33 0.00 5.005.005.005.000.00 0.00 4.50 11.67 0.02 35.00 0.00 0.00 4.19 15.00 13 0.00 0.00 24.05 3 41.15 0.00 17.64 0.00 11.33 1.590.00 0.00 0.000.00 58.18 0.00 39.23 0.00 0.00 0.00 0.00 0.02 0.65 0.64 <0.01 0.00 0.00<0.01 <0.01 22 1.31 % 11.43 47.14 0.00 14.29 0.00 0.00 0.00 14.29 0.00 0.00 15.71 32.86 1.431.430.00 0.00 1.4311.43 5.71 32.86 0.00 0.00 1.430.00 0.00 1.43 0.00 0.00 4.29 2.86 2 0.00 8 33.56 0.00 0.00 0.00 2.54 0.03 0.00 0.05 0.00 96.30 100.00 181.25 0.040.03 0.00 < 0.01 1.070.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.07 < 0.01 0.00 0.08 0.00 0.00 0.23 0.00 0.00 0.00 IRI 18.00 % FO10.0030.00 5.0020.00 0.00 0.000.00 0.00 0.0015.000.00 15.005.000.00 5.000.00 0.00 0.00 0.00 0.00 10.00 0.00 30.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 8.33 96.66 2.99 <0.01 0.00 0.00 0.00 0.030.00 0.01 0.60 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.03 0.00 0.00 0.03 0.00 В 0.03 <0.01 0.01 0.01 % 12.69 0.00 0.00 86.49 0.00 0.00 0.00 0.08 0.000.00 84.95 0.00 % N0.33 0.24 0.240.08 0.00 0.57 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 12.77 0.00 0.73 0.000.00 0.73 0.00 0.08 30.66 0.000.000.00 0.02 0.02 0.00 25.99 1.28 7.61 0.00 1.890.000.00 0.00 0.00 0.63 0.00 4.53 0.00 0.08 0.00 0.00 0.00 0.43 0.00 0.00 0.00 0.000.00 0.00 IRI FO5.5025.00 0.00 0.00 0.005.000.00 20.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 10.000.00 10.000.00 50.00 0.00 0.00 5.00 15.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 5.008.57 0.00 0.00 % 72.36 0.00 0.15 59.03 0.00 0.000.000.000.00 0.00 5.5927.49 0.00 0.00 <0.01 7.73 0.00 0.00 27.64 0.000.00 <0.01 0.00 0.00 0.00 0.00 <0.01 В 0.000.00 <0.01 0.00 % 0.3465.99 0.00 24.49 0.00 0.3463.61 25.17 0.00 8.50 0.00 0.00  $\geq$ 0.00 0.00 0.00 0.00 0.680.00 0.680.00 0.00 0.00 8.50 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 1.70 0.0 00.0 % 8.32 0.00 28.95 0.15 0.00 0.00 18.35 0.00 0.070.07 0.00 0.00 2.621.25 0.00 0.07 0.00 0.00 1.86 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.02 0.07 0.00 0.00 IRI FO25.000.00 5.000.00 5.5010.00 0.00 5.005.000.00 10.000.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 5.005.000.00 0.00 0.00 0.00 20.16 40.00 0.00 0.00 5.71 1.67% 79.84 9.690.00 55.80 0.05 0.04 0.00 14.27 0.00 20.16 0.000.00 0.00 0.00 0.000.00 0.00 0.00 0.00 <0.01 0.00 <0.01 <0.01 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 <0.01 0.00 % B1.43 0.00 71.43 60.00 0.00 0.00 25.71 0.00 % N0.00 2.860.00 0.00 1.432.860.00 1.43 0.00 0.00 4.29 0.00 25.71 0.00 0.00 0.00 0.00 0.000.00 1.43 1.43 0.00 0.00 0.19 79.14 0.3220.66 24.48 0.034.58 0.0411.34 0.33 40.67 0.620.19 0.15 8.81 0.45 0.30 0.000.00 0.250.250.32 1.04 0.500.00 0.00 2.41 0.02 0.00 0.01 0.01 IRI 23.5060.00 20.0010.0095.00 20.0020.00FO5.0060.00 10.005.0020.00 5.005.00 60.00 5.0038.57 45.0015.0015.0070.00 13.33 0.00 25.0015.000.00 0.00 0.00 0.00 20.0020.00% 73.29 10.96 14.97 0.930.170.3224.37 0.09 0.800.00 <0.01 <0.01 37.23 2.810.030.02 0.02 26.69 0.01 <0.01 0.00 0.00<0.01 <0.01 В 0.30 6.51 0.01 0.01 0.00 0.00 0.4 % 1.25 3.93 2.14 1.9614.64 1.07 0.18 0.180.18 78.75 2.14 58.93 11.79 3.75 1.79 0.00 0.00 1.25 % N0.18 4.82 0.360.18 0.000.00 l.61 1.61 3.57 1.25 1.61 0.89 0.00 椭圆背角无齿蚌 Anodonta woodiana elliptica 圆背角无齿蚌 Anodonta woodiana pacifica 方格短沟蜷 Semisulcospira cancellata 霍甫水丝蚓 Limnodrilus hoffmeisteri 日本沼虾 Macrobrachium nipponense 铜锈环棱螺 Bellamya aeruginosa 多棱角螺 Angulyagra polyzonata 梨形环棱螺 Bellamya purificata 扁舌蛭 Glossiphonia complanata 蚶形无齿蚌 Anemina arcaeformis 纹沼螺 Parafossarulus striatulus 长角涵螺 Alocinma longicomis 水丝蚓属一种 Limnodrilus sp. 光滑狭口螺 Stenothyra glabra 摇蚊科一种 Chironomidae sp. 标尾水虱属一种 Cythura sp. 湖沼股蛤 Limnoperna lacustris sb. 褶纹冠蚌 Cristaria plicata 黑荞麦蛤 Vignadula atrata 缢蛭 Sinonovacula constricta 圆顶珠蚌 Unio douglasiae 背瘤丽蚌 Lamprotula leai 钩虾属一种 Gammarus 颤蚓属一种 Tubifex sp. 河蚬 Corbicula fluminea 软甲纲 Malacostraca 寡毛纲 Oligochaeta 足纲 Gastropoda 双壳纲 Bivalvia 昆虫纲 Insecta 蛭纲 Hirudinea Species 革米 10 Ξ 4 17 19 20 21 53 2 12 13 15 16 1853 25 题 ŝ 4 9 × 6 Ś 

等:太浦河大型底栖动物群落组成及时空分布特征

贺湛斐

Relative abundance;% B;相对生物量 Relative biomass;% FO:相对频度 Relative frequency of occurrence; IRI:相对重要性指数 Index of relative importance

站点密度显著高于 T5 站点(P<0.05)。而在生物量方面,秋冬春夏四个季节各自在不同站点间均存在显著的 差异(P<0.05)。其中,在秋季 T1 站点的生物量显著高于 T3 站点(P<0.05)。冬季 T4 站点生物量显著高于 T3 与 T5 站点(P<0.05)。春季 T4 站点生物量显著高于 T5 站点(P<0.05)。夏季 T4 站点生物量显著高于 T3 与 T5 站点(P<0.05);而 T5 站点生物量则显著低于 T4 与 T1 站点(P<0.05)。总体来看,调查期间太浦河大型 底栖动物群落的密度与生物量各自在不同站点下的季节变化特征均有所差异;同时,二者各自在不同季节下 的站点分布特征亦有所不同。





Fig.2 Density and biomass of benthic macroinvertebrate assemblages in the different sampling seasons of the Taipu River (Mean ± Standard Error)

柱子上方相同小写字母表示不同季节之间不存在显著差异(P>0.05)



图3 太浦河不同站点大型底栖动物群落密度和生物量(平均值±标准误)

Fig.3 Density and biomass of benthic macroinvertebrate assemblages in the different sampling sites of the Taipu River (Mean ± Standard Error)

柱子上方不同小写字母表示不同站点之间存在显著差异(P<0.05)

# 2.3 物种多样性

不同季节大型底栖动物群落的多样性特征如图 5 所示,物种丰富度指数(D)、多样性指数(H')与均匀度 指数(J')三者在各季节间都呈现出冬季>春季>夏季>秋季的特点,但各指数在不同季节间均不存在显著差异 (P>0.05)。而在不同站点大型底栖动物群落的多样性特征如图 6 所示,不同站点间物种丰富度指数(D)和 多样性指数(H')均存在显著差异(P<0.05),而均匀度指数(J')差异不显著(P>0.05)。其中,对物种丰富度 (D)两两比较的结果显示,T1 站点显著高于 T2、T3 和 T4 站点(P<0.05);其它站点之间的差异均不显著(P> 0.05)。对多样性指数(H')两两比较的结果显示,T1 站点显著高于 T3 和 T4 站点(P<0.05);T5 站点显著高于 T4 站点(P<0.05);其它站点之间的差异均不显著(P>0.05)。对均匀度指数(J')两两比较的结果显示,T4 站 点显著低于 T5 站点(P<0.05);其它站点之间的差异均不显著(P>0.05)。由此可见,在多样性特征方面,T1 站点物种丰富度 D 与多样性 H'均为全河段最高,之后在 T2、T3、T4 站点 D、H'与均匀度 J'都出现了沿流程连



图4 太浦河不同站点各季节大型底栖动物群落密度和生物量(平均值±标准误)

Fig.4 Density and biomass of benthic macroinvertebrate communities in the different sampling seasons of each sampling site (Mean ± Standard Error)

柱子上方括号中的不同小写字母表示同一季节不同站点之间存在显著差异(P<0.05),括号上方不同小写字母表示同一站点不同季节之间 存在显著差异(P<0.05)

续下滑的情况,直至T5站点 H'与 J'出现显著回升,D 亦有所回升。

# 2.4 聚类排序分析与 ABC 曲线

针对不同站点不同季节的大型底栖动物群落进行的聚类与排序分析结果如图 7 所示。聚类分析将不同 站点、不同季节下的群落在相似性为 33.24%的水平上分为了 6 组。其中,T1 站点四季群落(10T1、12T1、3T1、 6T1)为一组,T4 站点四季群落(10T4、12T4、3T4、6T4)与 T3 站点春季群落(3T3)为一组,T5 站点秋、冬、春三 季群落(10T5、12T5、3T5)与 T2 站点春、夏季群落(3T2、6T2)为一组,T3 站点秋、冬季群落(10T3、12T3)与 T2 站点冬季群落(12T2)为一组,T3 与 T5 站点各自的夏季群落(6T3、6T5)为一组,T2 站点秋季(10T2)由于未 发现任何大型底栖动物,与其他组的相似性水平为 0%,因此被单独分为一组。排序分析为避免结果两极化, 剔除空样本(10T2)后的结果与聚类分析中相一致;胁强系数 Stress = 0.15,说明结果有一定参考价值。

太浦河各站点大型底栖动物群落 ABC 曲线如图 8 所示。不同站点底栖群落受到的干扰情况不尽相同, 沿流程自 T1(W = 0.054)至 T2(W = 0.005)再到 T3(W = -0.019),群落连续受到不断加重的环境胁迫,至 T4 (W = 0.038)干扰程度减轻,后在 T5(W = 0.176)降至全河段各站点中的最低水平。





**图 5 不同季节大型底栖动物群落物种多样性指数 D、H'、J'**(平均值±标准误)

Fig.5 Species diversity of benthic macroinvertebrate assemblages in the different sampling seasons (Mean ± Standard Error)

同一类型柱子上方标注同一类型的相同小写字母,表示同一指数 在不同季节之间不存在显著差异(P>0.05)



**图 6 不同站点大型底栖动物群落物种多样性指数 D、H'、J'**(平均值±标准误)

Fig.6 Species diversity of the benthic macroinvertebrate assemblages in the different sampling sites (Mean ± Standard Error)

同一类型柱子上方标注同一类型的不同小写字母,表示同一指数 在不同站点之间存在显著差异(P<0.05)



图 7 不同站点各季节大型底栖动物群落等级聚类分析及非度量多维标度排序分析

**Fig.7** Cluster and NMDS analysis on different benthic macroinvertebrate communities of each sampling season in different sampling sites 图中不同编号代表不同季节下不同站点的大型底栖动物群落,如 12T5 代表在冬季(2017 年 12 月)于T5 站点采得的底栖样本群落

# 3 讨论

# 3.1 太浦河大型底栖动物群落结构特征

从群落的物种组成特征来看,一些研究表明,在受人为干扰影响较大的河流、河段中,大型底栖动物群落 普遍以寡毛纲颤蚓类及昆虫纲摇蚊类物种为主,特别是以霍甫水丝蚓为代表的耐污种为绝对优势种;腹足类、 双壳类等软体动物在群落密度中占比普遍偏低;以 EPT 水生昆虫(蜉蝣目 Ephemeroptera、襀翅目 Plecoptera、 毛翅目 Trichoptera)为代表的敏感物种缺失或急剧减少,由此形成以小型机会种为主,总密度普遍较高、总生 物量普遍较低的群落特点<sup>[44-45]</sup>。如 1996 年至 2006 年期间,苏州河下游的市区河段相比其上游郊区河段,霍 甫水丝蚓的密度急剧增加而软体动物占比明显下降,使苏州河长年存在上游密度相对低、生物量较高,下游密 度很高、生物量相对低的情况<sup>[46]</sup>。这些特点在快速发展的太湖流域东部平原区的许多河流中也有所体现,其 中寡毛类更是占到了该区域主要河流大型底栖动物平均密度的九成<sup>[3,16-17,47]</sup>。而本研究发现在同属该区域 的太浦河中,大型底栖动物整体平均密度为 356 个/m<sup>2</sup>,平均生物量为 445.10g/m<sup>2</sup>,其中河蚬各占 58.84% 与



图 8 不同站点大型底栖动物群落丰度/生物量比较曲线及分离系数 W

Fig.8 Abundance and biomass comparison curves and separation statistic *W* of benthic macroinvertebrate assemblages in the different sampling sites

67.05%,铜锈环棱螺各占 19.39%与 9.26%;而霍甫水丝蚓只占密度的 9.63%,在生物量中占比不超过 0.01%。 作为太浦河绝对优势种的河蚬与铜锈环棱螺二者所属的双壳类和腹足类是太浦河大型底栖动物群落密度以 及生物量的主要贡献者;而霍甫水丝蚓仅在下游表现出一定的优势度,使太浦河形成以软体动物为主、密度较 低而生物量较高的群落特点,与同区域中的许多其它河流相比显示出一定的差异性。

从群落的时空分布特征来看,本研究发现太浦河大型底栖动物群落的密度、生物量及多样性特征在不同 站点间均存在显著的差异;而在不同季节间均不存在显著差异。在一些受人为干扰较为强烈且不均一的河流 中也存在类似的情况,例如在梁滩河分布于乡村、城区与下游三类不同人类影响水平区段中的底栖群落彼此 间在密度、物种丰度、H'及J'上都具有显著的空间差异<sup>[48]</sup>;而在持续受到工农业影响的淮河流域,其干流的软 体动物群落在一年四季中的生物量、D、H'及J'均无显著的季节变化<sup>[49]</sup>;在嘉陵江与长江交汇河段,位于不同 城市发展水平下的群落其组间物种丰度与H'均存在显著差异,而在同一水平下的不同季节间则均不存在显 著差异<sup>[50]</sup>。本研究对太浦河的聚类排序分析中在 60%相似性水平以上的 5 个聚类组中,有 4 组均是由在同 一站点下不同季节的群落组成(3T4、12T4、6T4;10T1、12T1、3T1;3T2、6T2;10T5、12T5),只有一组由不同站点 在同一季节下的群落组成(6T3、6T5),表明相较不同的站点之间,同一站点下不同季节的群落间相似度普遍 更高;也反映出群落在空间上的分异较季节间更为明显。由此可以看出太浦河大型底栖动物群落受沿程生境 条件的影响较为深刻,而季节变化对其产生的影响有限。

# 3.2 生境条件对太浦河大型底栖动物群落结构的影响

生境作为生物个体、种群或群落赖以生存的地域环境,包含生物必需的生存条件以及其它对生物产生影响的生态因素<sup>[51]</sup>。太浦河作为近三十年太湖最主要的出湖河流,其年出湖水量及占比均值为环太湖各水资

源分区最大[52];其本身在流域尺度上的水文连通格局对大型底栖动物群落的物种组成有深刻的影响。 Obolewski 等在对波兰河流洪泛区的研究中发现,被阻隔的牛轭湖与主河道在水文上重新连通后,湖内大型底 栖动物的多样性及多度均有增加<sup>[53]</sup>,且与河流完全连通的牛轭湖相较部分连通的情况,群落 Shannon 多样性 也相对更高[54]。由此可见,良好的水文连通性通常会促进底栖动物的扩散与分布,有利于群落物种多样性的 维持。在陈桥等对太湖流域大型底栖动物的研究中,部分湖泊(长荡湖、滆湖、太湖)下游的出湖河流具有相 较京杭运河及其以北河流更高的物种丰富度[16];在本研究中,承接东太湖下泄来水的太浦河上游 T1 站点也 具有全河段最高的物种多样性。现阶段东太湖主要分布的大型底栖动物优势类群主要是以河蚬与铜锈环棱 螺为代表的双壳类和腹足类[55],这与本研究中太浦河整体以绝对优势种河蚬与铜锈环棱螺为代表的软体动 物为主的情况是一致的。此外,在吴召仕等<sup>[17]</sup>对太湖流域大型底栖动物的研究中发现,五个主要水系(苕溪、 南河、洮滆、黄浦江、沿江)的软体动物类群其相对密度与相对生物量的最高值均出现在黄浦江水系;而本研 究中作为黄浦江上游水系组成部分的太浦河,其软体动物的相对密度与相对生物量也都是所有类群中最高 的,由此形成群落总密度偏低、总生物量偏高的鲜明特点。综上,本研究推断在人为闸控影响的水文连通格局 下,随东太湖下泄太浦河的出湖水流,仍存在自上而下一定程度的物种扩散与延续,使得太浦河在物种组成及 优势种方面受到上游太湖的影响。而这种以软体动物为主的群落组成特征相比一般城市河流中的优势类群 寡毛类、摇蚊类等小型机会种或是受干扰较小的自然河流中具有强烈季节性波动的 EPT 昆虫等敏感种而 言[56-57],由于其物种生命周期更长、耐污能力较强,且无明显的季节性生活史,会降低群落的季节性变化[58]。 因而本研究中大型底栖动物在季节尺度上能够保持相对稳定的密度、生物量及物种多样性,与太浦河水文连 通格局影响下的群落组成特征有密切的关系。

水体作为底栖动物赖以维系的环境介质,其营养水平对底栖群落的分布有重要的影响。由于太浦河沿程 驳船航运及两岸人类活动较为频繁,其在河段尺度上的水质受到外界不同程度的干扰与污染。如表征太浦河 受航运干扰程度的船舶通行量与水体石油类污染在空间上具有显著的正相关性,二者均在京杭运河以西的太 浦河上游最低,在运河以东的中游不断升高并于下游逐渐降低<sup>[19]</sup>。在本研究中,不同站点的分离系数 W 也 反映出太浦河底栖群落沿流程受到自较低水平(T1)连续加重(T2、T3)后逐步减轻(T4、T5)的干扰,这与物种 丰富度 D 及多样性 H'自高值(T1)先下降(T2、T3、T4)后上升(T5)的空间变化在一定程度上是负相关的,这 种关系同许多研究[45,48,50,58-59]一致,同时也从侧面显示出大型底栖动物类群对水环境较好的响应与指示作 用。此外,这种负相关关系同样存在于富营养化与多样性之间,在湖泊及河流中当水体从适宜的中营养向富 营养过渡大型底栖动物的多样性会明显降低<sup>[60-61]</sup>。陈丹通过以往监测数据发现太浦河流域水质具有自上游 逐渐变差至下游好转的空间差异特征[24];值得注意的是,长期以来太浦河上游东太湖即太湖东部湖湾区作为 沉水植物等水生植被的主要分布区<sup>[62]</sup>,对水体中氮磷营养盐及污染物等的吸收与拦截<sup>[63]</sup>使得水质相对其它 湖区更好<sup>[64-66]</sup>。因此,结合本研究中分离系数 W 与物种多样性的变化情况,推断东太湖对于太浦河而言可 能具有类似前置库的作用<sup>[16]</sup>,使T1上游来水营养水平相对适宜<sup>[67]</sup>,进而分布有全河段最高的物种多样性以 及较高的群落密度与生物量;其后 T2、T3 不断加重的干扰导致水质变差,因而多样性连续下降,密度与生物 量也均处于低位;至T5干扰降低水质有所好转,多样性随之明显回升。而T4偏低的多样性及其与T5二者差 异较大的密度及生物量,则与生境的底质条件息息相关。

底质作为底栖动物生存栖居的物质基础,其类型是影响河流大型底栖动物群落分布的关键因素<sup>[68]</sup>。在本研究中,底质类型明显不同的两个相邻站点 T4 和 T5 在密度、生物量与物种多样性方面均有显著的差异(P<0.05)。相较上游站点,以稳定的砾石为主要底质的 T4 呈现出河蚬这一绝对优势种的集群分布;而以有机质含量丰富的淤泥为底质的 T5 站点腹足类的优势度较双壳类更高,且寡毛类霍甫水丝蚓的出现频度与优势度也均较其它站点更高。已有研究表明水深和流速两个水动力条件对溪流中双壳类的分布具有促进作用<sup>[69]</sup>;较大的水深与流速有利于砾石底质的筛选,从而形成更为稳定的基底环境,为河蚬的锚定与埋栖提供适宜的生境条件<sup>[70]</sup>。结合太浦河实际情况,本文认为生境偏好不同的底栖动物在不同底质下的定殖促进了

群落在空间上的分异。根据 T4 相较其它站点水深而流急且紧邻汾湖的特殊区位情况,推测上游汾湖来水在 流经该断面时由于河面收拢导致水深与流速增加,进而促进了砾石底质的形成,为个体质量相对较大的河蚬 提供了更加稳定且适宜的生境;同时有研究显示太浦河浮游动物在汾湖多样性最高、密度也相对较大<sup>[18]</sup>,这 为下游营滤食性生活的河蚬提供了充足的食物来源,因而其在 T4 站点的优势度不成比例地大于其它物种及 站点,由此形成全河段最高的群落密度(983 个/m<sup>2</sup>)与生物量(1381.29g/m<sup>2</sup>)以及最低的物种多样性。而在 T5 站点由于河段更宽流速减缓,水体中来自上游的泥砂、有机碎屑等在这里进一步沉积,形成表层赋存大量 有机质及较高营养盐的淤泥底质,营穴居生活的寡毛类与营底上栖居的部分腹足类等个体质量偏小、耐受能 力更强的底栖动物能够较好地适应,因而在 T5 形成相对最低的群落密度(56 个/m<sup>2</sup>)与生物量(17.26 g/m<sup>2</sup>)。

除此之外,太浦河通过闸控保障水源地取水安全的水量调度方式、人工堤岸的高度硬质化以及边滩植被的退化缺失,都会导致河流整体及其局部上生境异质性的降低,进而造成大型底栖动物群落物种丰富度的减少;而支流湖荡汇水、频繁持久的航运干扰、沿程码头与驳船以及两岸城镇与企业生产生活的污废排放<sup>[18-19]</sup>,同受到外界干扰的水体理化因子如电导率<sup>[71-73]</sup>、溶解氧<sup>[74]</sup>、pH<sup>[4,75]</sup>及总氮<sup>[3,17,76-77]</sup>等一起,对底栖动物群落产生着影响。

综上所述,太浦河大型底栖动物的群落结构既与流域尺度上河流的水文连通格局密切相关,又受到来自 河段尺度的水体营养水平、底质类型以及生境异质性等环境因素的影响;两种不同尺度下的生境条件相互联 系、相互影响、共同作用于底栖群落,其中的综合作用机理还有待进一步研究。鉴于目前太浦河作为金泽水源 地重要的"清水走廊"与调水保护区,以及大型底栖动物群落对水生环境和外界干扰较好的指示与响应功能, 建议从流域与河段两方面着手对太浦河现阶段的工农业与生活污染以及植被带受损岸段进行治理与修复;同 时对东太湖-太浦河-金泽水库全水源地开展大型底栖动物的定期监测,为保护与管理金泽水源地的生态与 环境及时提供重要依据。

# 参考文献(References):

- [1] Niemi G J, McDonald M E. Application of ecological indicators. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2004, 35(1): 89-111.
- [2] 任海庆,袁兴中,刘红,张跃伟,周上博.环境因子对河流底栖无脊椎动物群落结构的影响. 生态学报, 2015, 35(10): 3148-3156.
- [3] 张又,刘凌,蔡永久,尹洪斌,高俊峰,高永年.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,2015,35(5): 1535-1546.
- [4] 李艳利,李艳粉,徐宗学.影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析.环境科学,2015,36(1):94-106.
- [5] Li L, Zheng B H, Liu L S. Biomonitoring and bioindicators used for river ecosystems: definitions, approaches and trends. Procedia Environmental Sciences, 2010, 2: 1510-1524.
- [6] 段学花, 王兆印, 徐梦珍. 底栖动物与河流生态评价. 北京:清华大学出版社, 2010: 12-106.
- [7] Yan J, Xu Y, Sui J, Li X Z, Wang H F, Zhang B L. Long-term variation of the macrobenthic community and its relationship with environmental factors in the Yangtze River estuary and its adjacent area. Marine Pollution Bulletin, 2017, 123(1/2): 339-348.
- [8] 石晶, 杜颖, 张宇航, 张敏, 蔡庆华, 渠晓东. 多级闸坝对大型底栖动物群落日漂流规律的影响. 环境科学研究, 2020, 33(8): 1894-1900.
- [9] 潘保柱, 王兆印, 何雪宝. 西江大型底栖动物群落特征研究. 水生生物学报, 2011, 35(5): 851-856.
- [10] Mangadze T, Wasserman R J, Froneman P W, Dalu T. Macroinvertebrate functional feeding group alterations in response to habitat degradation of headwater Austral streams. Science of the Total Environment, 2019, 695: 133910.
- [11] Jiang X M, Xiong J, Xie Z C, Chen Y F. Longitudinal patterns of macroinvertebrate functional feeding groups in a Chinese river system: a test for river continuum concept (RCC). Quaternary International, 2011, 244(2): 289-295.
- [12] Yoshimura C, Tockner K, Omura T, Moog O. Species diversity and functional assessment of macroinvertebrate communities in Austrian rivers. Limnology, 2006, 7(2): 63-74.
- [13] 王博涵,吴丹,张吉,殷旭旺,赵长森,窦同文.济南河流大型底栖动物摄食功能群多样性及时空动态.生态学报,2017,37(21): 7128-7139.
- [14] 本刊编辑部.上海四大水源地的故事.中国三峡, 2018, 249(2): 58-63.
- [15] 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.应用生态学报,2011,22(12):3329-3336.
- [16] 陈桥,张翔,沈丽娟,张小琼,周俊,张咏,牛志春,徐东炯.太湖流域江苏片区底栖大型无脊椎动物群落结构及物种多样性.湖泊科学,

2017, 29(6): 1398-1411.

- [17] 吴召仕,蔡永久,陈宇炜,邵晓阳,高俊峰.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,2011,23(5): 686-694.
- [18] 王秀英,白音包力皋,许凤冉,刘丰.太浦河水生态调查分区与改善措施研究.水利学报,2013,44(9):1130-1136.
- [19] 谢伊涵. 太浦河水源地石油污染特征与环境风险评估[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
- [20] 水利部太湖流域管理局水文局. 2017 年太湖流域片水情年报. (2018-06-19) [2022-04-15]. http://www.tba.gov.cn/slbthlyglj/sqnb/content/slbth\_66066c5bc8484d97b17c2a5b728a0910.html.
- [21] 水利部太湖流域管理局水文局. 2018 年太湖流域片水情年报. (2019-08-20) [2022-04-15]. http://www.tba.gov.cn/slbthlyglj/sqnb/content/slbthl\_aa64df585842462d8a581a1010c94e98.html.
- [22] 水利部太湖流域管理局. 2017 年度太湖流域及东南诸河水资源公报. (2018-10-16) [2022-04-15]. http://www.tba.gov.cn/slbthlyglj/szygb/ content/slbt1\_f8d36e2e2e43462d9cb0d9dadb0dcce0.html.
- [23] 水利部太湖流域管理局. 2018 年度太湖流域及东南诸河水资源公报. (2019-08-19) [2022-04-15]. http://www.tba.gov.cn/slbthlyglj/szygb/ content/slbt1\_7b417848365f411f8f5f0200e3cec1a3.html.
- [24] 陈丹. 黄浦江上游省际河流太浦河的水环境影响因素与保护协调机制[D]. 上海:华东师范大学, 2016.
- [25] Yao H, Qian X, Gao H L, Wang Y L, Xia B S. Seasonal and spatial variations of heavy metals in two typical Chinese rivers: concentrations, environmental risks, and possible sources. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2014, 11(11): 11860-11878.
- [26] 程铭, 张永鹏, 张波, 何义亮. 新建水源库区周边水域有机物及营养盐赋存特征分析. 净水技术, 2019, 38(7): 71-77.
- [27] 李根,谢伊涵,王话翔,杨凯.太浦河水源地沿线石油类污染特征与影响因素分析.华东师范大学学报:自然科学版,2020,66(6): 144-153.
- [28] Laffaille P, Feunteun E, Lefeuvre J C. Composition of fish communities in a European macrotidal salt marsh (the Mont Saint-Michel Bay, France).
  Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2000, 51(4): 429-438.
- [29] Pinkas L, Oliphant M S, Iverson I L K. Food habits of albacore, bluefin tuna, and bonito in California waters. Fish Bulletin, 1971, 152(1): 1-105.
- [30] 童春富. 长江河口潮间带盐沼植被分布区及邻近光滩鱼类组成特征. 生态学报, 2012, 32(20): 6501-6510.
- [31] 林良羽, 童春富, 李秀珍. 崇明东滩藻类盐渍带大型底栖动物功能群的划分及其分布特征. 生态学杂志, 2015, 34(8): 2229-2237.
- [32] Clarke K R, Gorley R N, Somerfield P, Warwick R M. Change in Marine Communities: An Approach to Statistical Analysis. Plymouth: Primer-E Ltd., 2014.
- [33] Ludwig J A, Reynolds J F. Statistical Ecology: A Primer on Methods & Computing. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1988.
- [34] 杨泽华, 童春富, 陆健健. 盐沼植物对大型底栖动物群落的影响. 生态学报, 2007, 27(11): 4387-4393.
- [35] 蔡永久,姜加虎,张路,陈宇炜,龚志军.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,2010,22(6):811-819.
- [36] 张又,程龙,尹洪斌,高俊峰,张志明,蔡永久.巢湖流域不同水系大型底栖动物群落结构及影响因素.湖泊科学,2017,29(1): 200-215.
- [37] Clarke K R. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. Australian Journal of Ecology, 1993, 18(1): 117-143.
- [38] 童春富,章飞军,陆健健.长江口海三棱藨草带生长季大型底栖动物群落变化特征.动物学研究,2007,28(6):640-646.
- [39] Clarke K, Gorley R. PRIMER (Plymouth Routines in Multivariate Ecological Research) V5: User Manual/Tutorial. Plymouth: Primer-E Ltd., 2001.
- [40] Warwick R M. A new method for detecting pollution effects on marine macrobenthic communities. Marine Biology, 1986, 92(4): 557-562.
- [41] 王宝强,刘学勤,彭增辉,杨震东.三峡水库底栖动物群落结构特征及其与蓄水前资料的比较.水生生物学报,2015,39(5):965-972.
- [42] Warwick R M, Clarke K R. Relearning the ABC: taxonomic changes and abundance/biomass relationships in disturbed benthic communities. Marine Biology, 1994, 118(4): 739-744.
- [43] 李乃成,刘晓收,徐兆东,赵瑞,石洪华.庙岛群岛南部海域大型底栖动物多样性.生物多样性,2015,23(1):41-49.
- [44] Walsh C J, Roy A H, Feminella J W, Cottingham P D, Groffman P M, Morgan R P. The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. Journal of the North American Benthological Society, 2005, 24(3): 706-723.
- [45] Wang B X, Liu D X, Liu S R, Zhang Y, Lu D Q, Wang L Z. Impacts of urbanization on stream habitats and macroinvertebrate communities in the tributaries of Qiangtang River, China. Hydrobiologia, 2012, 680(1): 39-51.
- [46] 程曦,李小平,陈小华.苏州河水质和底栖动物群落 1996—2006 年的时空变化. 生态学报, 2009, 29(6): 3278-3287.
- [47] Zhang Y, Liu L, Cheng L, Cai Y J, Yin H B, Gao J F, Gao Y N. Macroinvertebrate assemblages in streams and rivers of a highly developed region (Lake Taihu Basin, China). Aquatic Biology, 2014, 23(1): 15-28.
- [48] Wang Q, Roß-Nickoll M, Wu D, Deng W, Wang Z J, Yuan X Z, Zhang Y G. Impervious area percentage predicated influence of rapid urbanization on macroinvertebrate communities in a southwest China river system. Science of the Total Environment, 2018, 627: 104-117.
- [49] 丁建华,周立志,邓道贵,金显文.淮河干流软体动物群落结构及其与环境因子的关系.水生生物学报,2013,37(2):367-375.
- [50] Luo K, Hu X B, He Q, Wu Z S, Cheng H, Hu Z L, Mazumder A. Impacts of rapid urbanization on the water quality and macroinvertebrate

communities of streams: a case study in Liangjiang New Area, China. Science of the Total Environment, 2018, 621: 1601-1614.

- [51] 孙儒泳,李博,诸葛阳,尚玉昌.普通生态学.北京:高等教育出版社,1993:1-324.
- [52] 林鹏,陈启慧,李琼芳,皋云,朱玉婷,许树洪.环太湖各水资源分区入出湖水量及贡献分析.水资源保护,2021,37(3):66-73.
- [53] Obolewski K, Glińska-Lewczuk K, Ożgo M, Astel A. Connectivity restoration of floodplain lakes: an assessment based on macroinvertebrate communities. Hydrobiologia, 2016, 774(1): 23-37.
- [54] Obolewski K, Glińska-Lewczuk K, Strzelczak A. Does hydrological connectivity determine the benthic macroinvertebrate structure in oxbow lakes? Ecohydrology, 2015, 8(8): 1488-1502.
- [55] 许浩, 蔡永久, 汤祥明, 邵克强, 秦伯强, 龚志军. 太湖大型底栖动物群落结构与水环境生物评价. 湖泊科学, 2015, 27(5): 840-852.
- [56] 蒋万祥, 贾兴焕, 周淑婵, 李凤清, 唐涛, 蔡庆华. 香溪河大型底栖动物群落结构季节动态. 应用生态学报, 2009, 20(4): 923-928.
- [57] 李杨,蒋万祥,李斌,汪兴中,蔡庆华.2009年苍山水系6条源头河流中的大型底栖动物群落结构季节动态.湿地科学,2016,14(5): 733-739.
- [58] Helms B S, Schoonover J E, Feminella J W. Seasonal variability of landuse impacts on macroinvertebrate assemblages in streams of western Georgia, USA. Journal of the North American Benthological Society, 2009, 28(4): 991-1006.
- [59] 王强, 庞旭, 王志坚, 袁兴中, 张耀光. 城市化对河流大型底栖动物群落的影响研究进展. 生态学报, 2017, 37(18): 6275-6288.
- [60] 龚志军,谢平,唐汇涓,王士达.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.
- [61] Xu M Z, Wang Z Y, Duan X H, Pan B Z. Effects of pollution on macroinvertebrates and water quality bio-assessment. Hydrobiologia, 2014, 729 (1): 247-259.
- [62] 李静泰, 闫丹丹, 戚丽萍, 史丹, 栾兆擎. 太湖湿地植被时空变化特征及其驱动机制. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2021, 57(1): 94-103.
- [63] 吴筱清. 太湖水环境特征及沉积物有机质来源识别[D]. 南京: 南京大学, 2015.
- [64] 水利部太湖流域管理局. 太湖健康状况报告(2016). (2017-09-11)[2021-09-18]. http://www.tba.gov.cn/slbthlyglj/thjkzkbg/content/slth1\_5d691c607c6c4b6fae10962853b6b9de.html.
- [65] 水利部太湖流域管理局.太湖健康状况报告(2017).(2019-08-28)[2021-09-18].http://www.tba.gov.cn/slbthlyglj/thjkzkbg/content/slth1\_ 2de006ce9999438e93c118d351e1dc53.html.
- [66] 水利部太湖流域管理局. 太湖健康状况报告(2018). (2019-12-05)[2021-09-18]. http://www.tba.gov.cn/slbthlyglj/thjkzkbg/content/slth1\_09f7d6b21629439f9891c7fd70ad49d8.html.
- [67] 曹菊萍,彭焱梅,李吴洋,张亚洲.太浦闸控制运用对流域区域及金泽水源地的影响分析//加强城市水系综合治理共同维护河湖生态 健康——2016 第四届中国水生态大会论文集.海宁:北京沃特咨询有限公司,2016;441-451.
- [68] 段学花, 王兆印, 程东升. 典型河床底质组成中底栖动物群落及多样性. 生态学报, 2007, 27(4): 1664-1672.
- [69] Layzer J B, Madison L M. Microhabitat use by freshwater mussels and recommendations for determining their instream flow needs. Regulated Rivers: Research & Management, 1995, 10(2/4): 329-345.
- [70] Morales Y, Weber L J, Mynett A E, Newton T J. Effects of substrate and hydrodynamic conditions on the formation of mussel beds in a large river. Journal of the North American Benthological Society, 2006, 25(3): 664-676.
- [71] Medupin C. Spatial and temporal variation of benthic macroinvertebrate communities along an urban river in Greater Manchester, UK. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(2): 84.
- [72] Miserendino M L, Brand C, Di Prinzio C Y. Assessing urban impacts on water quality, benthic communities and fish in streams of the Andes Mountains, Patagonia (Argentina). Water, Air, and Soil Pollution, 2008, 194(1/4): 91-110.
- [73] Johnson R C, Jin H S, Carreiro M M, Jack J D. Macroinvertebrate community structure, secondary production and trophic-level dynamics in urban streams affected by non-point-source pollution. Freshwater Biology, 2013, 58(5): 843-857.
- [74] Cooper S D, Lake P S, Sabater S, Melack J M, Sabo J L. The effects of land use changes on streams and rivers in Mediterranean climates. Hydrobiologia, 2013, 719(1): 383-425.
- [75] 谭颖,郑训皓,陈慈,刘玥,王璐,官昭瑛,杨海军,韩博平.流溪河大型底栖动物群落的时空分布及其影响因子.生态学报,2021,41 (2):747-760.
- [76] 张勇,刘朔孺,于海燕,刘东晓,王备新.钱塘江中游流域不同空间尺度环境因子对底栖动物群落的影响.生态学报,2012,32(14): 4309-4317.
- [77] 贺玉晓, 李珂, 任玉芬, 王思琪, 方文颖. 春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因子分析. 环境科学, 2020, 41(6): 2951-2962.