DOI:10.15928/j.1674-3075.202012070338

上海城市河流浮游动物季节变化及其与环境因子的关系

张晟曼[1,2], 何培民[1,2], 刘　炜[1,2], 刘金林[1,2], 陈嗣威[1,2],
韩　政[1,2],汤春宇[1,2], 谭　梦[1,2], 吴美琴[1,2]

(1.上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海　201306;
2.水域环境生态上海高校工程研究中心, 上海　201306)

摘要:探究城市河道水体中浮游动物群落分布的变化及影响因素,为城市河流的水质评价和生态监测提供理论支持,并为城市河流生态修复和河道生态环境保护措施的制定提供基础数据。于 2017 年 9 月至 2018 年 8 月对上海徐汇区代表性的城市河道进行环境因子和浮游动物群落结构的周年调查,共采集到浮游动物 32 种,其中轮虫 25 种,桡足类 4 种,枝角类 3 种。全年浮游动物优势种 12 种,包括轮虫 10 种,桡足类 1 种,枝角类 1 种。环境因子的季节变化导致浮游动物差异显著,浮游动物种数、丰度和生物量均为夏季最高,冬季最低。浮游动物的典范对应分析(CCA)显示,氮磷比、叶绿素 a 浓度和溶解氧是影响研究河道浮游动物群落差异的显著环境因子。运用水质理化因子、多样性指数及浮游动物优势种进行水质污染评价,该河流水质状况属于中污型。

关键词:城市河道;浮游动物;季节变化;环境因子;典范对应分析;上海市

中图分类号:Q178.1　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1674-3075(2022)05-0042-07

城市河道在城市的防洪、排涝、航运、供水以及纳污等方面起着重要的作用,是现代文明城市发展的重要生态环境标志。上海作为中国现代化都市之一,城区内河网交错、水系纵横,水质的好坏与城市的市容、景观和民众的生活密切相关。因此,开展上海城区内河流浮游动物调查,对水体进行水质评价,了解影响浮游动物季节分布的环境因子具有重要意义。浮游动物是水域生态系统的重要组成部分,对水域生态系统的物质循环、能量流动和信息传递起着十分重要的作用(孟顺龙等, 2016)。许多浮游动物对水体污染物非常敏感,常被用作监测和评价水体质量的指示生物(Gulati, 1983)。同时,水域生态系统中的环境因子也会影响浮游动物的种类组成和密度变化。因此,研究浮游动物群落的动态变化与水生生态系统的质量、结构、功能和生产力之间的关系具有重要意义。然而,国内外关于浮游动物和水域生态系统关系的研究多集中在近海、湖泊和水库等(刘巧等, 2019; Jiang et al, 2014;刘歆璞等, 2013),对于城市河道的研究则较少。

本文调查分析上海市徐汇区城市河流中的环境因子和浮游动物的密度、生物量、优势种和群落组成的季节变化,并探究该河道浮游动物的群落变化和环境因子之间的关系。研究结果可为徐汇区城市河流的水质评价和生态监测提供理论支持,并为今后修复相似类型的城市河流生态系统和河道生态环境保护措施的制定提供基础数据。

1　材料与方法

1.1　研究区域与采样点

研究区域为上海市徐汇区的一条城市河流(图 1),该河流长约为 10 km,平均水深 1.6 m,平均流速 0.35 m/s。该地区建有水泥厂,可能会对调查环境产生影响。研究区四季分明,年均降水量 1 143.1 mm,6−7 月梅雨期降水量最多,12 月最少,为 38.5 mm。徐汇区年平均气温 15.5℃。最低平均气温为 1 月的 3℃;最高平均气温为 8 月的 27.5℃。根据河流特点和周围环境布设了 6 个采样点(图 1),水深 1.5~2.0 m,平均 1.6 m。

从 2017 年 9 月到 2018 年 8 月(2017 年 9、10、11 月为秋季; 2017 年 12 月、2018 年 1、2 月为冬季; 2018 年 3、4、5 月为春季; 2018 年 6、7、8 月为夏季),每个位点每月采集 1 次,每次采集 3 份水样。现场用多参数水质分析仪(HACH, DR1900,北京)测量水温(WT)、溶解氧(DO)及氧化还原电位(ORP)等水质数据;用透明度盘测量水体透明度(SD)。

收稿日期:2020-12-07　　**修回日期:**2022-06-24

基金项目:"十三五"水专项:苏州区域水质提升与水生态安全保障技术及综合示范项目(2017ZX07205)。

作者简介:张晟曼,1997 年生,男,硕士研究生,主要研究方向为水域生态学。E-mail:1227429381@qq.com

通信作者:吴美琴,女,讲师,主要研究方向为鱼类生态学。E-mail:mqwu@shou.edu.cn

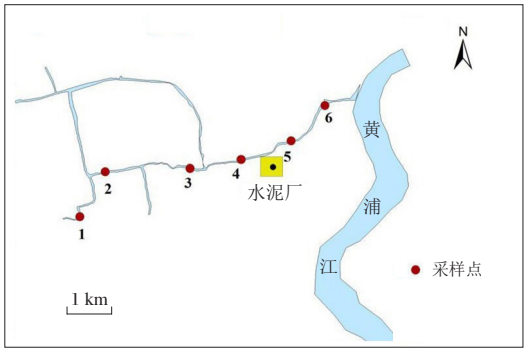


图 1　研究区及采样点分布

Fig.1　Study area and sampling sites

1.2　样品采集与处理

定性样本：用浮游动物网（原生动物和轮虫用孔径为64 μm的浮游动物网；枝角类和桡足类用128 μm的浮游动物网）在水面以下 0.5 m处以“∞”字型循环缓慢拖动5 min，将过滤后的水样收集在50 mL定性瓶中，并用福尔马林溶液固定，带回实验室并在显微镜下鉴定（韩茂森和束蕴芳, 1995）。

定量样品：轮虫用玻璃采水器在水面以下0.5 m和距离水底0.5 m 处各采集5 L 水样，等量混合后取1 L水样，加入鲁哥试剂固定，带回实验室静置48 h后，浓缩并定容至50 mL；桡足类和枝角类用采水器采集20 L水样，经64 μm浮游动物网过滤后收集在100 mL样品瓶中，用福尔马林溶液固定后带回实验室。参照相关资料（王家楫, 1961；沈嘉瑞, 1979；蒋燮治和堵南山, 1979）在显微镜下鉴定、计数并计算生物量。

1.3　水质理化指标的测定

将采集后的水样加入1 mL硫酸(密度为1.84 g/mL)进行固定，4℃保存，3 h 内测定总氮（TN）、总磷（TP）、氨氮（NH_4^+-N）、水体叶绿素 a（Chl-a）的浓度（Helena et al, 2000）。用国标法分析高锰酸盐指数（COD_{Mn}）（Walter, 1961）。

2　数据统计与分析

2.1　数据统计

采用优势度指数（Y）（徐兆礼和陈亚瞿, 1989）、Shannon-Wiener 多样性指数（H'）（Wilhm, 1968）、Margalef 丰富度指数（D）（Margalef, 1958）和 Pielou 均匀度指数（J'）（Pielou, 1966）分析该区域浮游动物群落的结构特征。计算公式如下：

$$Y = (N_i/N) \times f_i \quad ①$$

$$H' = -\sum(P_i)(\ln P_i) \quad ②$$

$$D = (S-1)/\ln N \quad ③$$

$$J = H'/\ln S \quad ④$$

式中：$P_i=N_i/N$，N_i为浮游动物群落中第 i 种物种的密度；N为浮游动物总个体数；f_i为第 i 种浮游动物出现的频率；S为总种类数。本次研究以优势度指数 Y>0.02 的物种作为该调查区域的优势种。

2.2　数据分析

利用 SPSS 26.0 统计分析软件对结果进行显著性分析，利用 Canoco 5.0 软件进行除趋势对应分析 (Detrended Correspondence Analysis, DCA) 与典范对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA)，DCA 用于判断浮游动物与环境因子之间的线性或非线性关系，从而决定下一步分析模型的使用（Becker et al, 2009）。如果从 DCA 分析中获得的浮游动物梯度长度小于 3 个标准偏差，使用冗余分析 (redundancy analysis，RDA)，反之，则使用 CCA（Piirsoo et al, 2007）。用 Prism 7.0 软件绘制统计图。

3　结果

3.1　环境因子的季节变化

研究区水环境因子季节变化见表1。河流水温季节变化明显，DO和ORP存在显著差异（P<0.001）。河流营养盐浓度偏高，且存在明显的季节差异（P<0.001）。从水体环境因子调查结果来看，该河流的水质较差。

3.2　浮游动物群落结构特征与季节变化

本调查共采集到浮游动物32种（表 2），其中轮虫25 种，枝角类4种，桡足类3种，分别占总数的 78.1%、12.5%、9.4%。春、夏和秋季均采集到3个类群浮游动物，而冬季仅采集到轮虫和桡足类。4个季节除冬季外优势种均为轮虫，其中春季轮虫种类数占比最高，为83.3%；桡足类占比最高出现在冬季，为 60%；枝角类占比最高出现在秋季，为 17.6%。

表 1　2017-2018 年研究区水环境因子季节变化

Tab.1　Seasonal variation of environmental factors in the study area from 2017 to 2018

环境因子	2017年秋	2017 年冬	2018 年春	2018 年夏
WT/℃	20.95±0.37	7.7±1.13	12.57±0.94	24.63±0.77
SD /m	0.34±0.04	0.36±0.05	0.52±0.14	0.41±0.03
COD_{Mn} /mg·L^{-1}	7.94±0.96	7.28±1.36	5.11±0.97	6.88±0.60
ORP /mV	15.0±1.55	68.17±3.17	109.0±12.46	88.67±5.56
DO / mg·L^{-1}	1.91±0.63	2.35±0.45	3.27±0.48	2.62±0.40
TN / mg·L^{-1}	4.27±0.60	6.96±0.69	5.51±0.76	4.68±0.67
TP/ mg·L^{-1}	0.18±0.02	0.18±0.06	0. 29±0.04	0.36±0.06
TN/ mg·L^{-1}	44.43±1.72	51.42±4.88	19.85±2.61	13.17±2.42
NH_4^+-N / mg·L^{-1}	2.69±0.25	0.43±0.06	3.08±0.78	2.88±0.49
Chl-a /μg·L^{-1}	6.92±1.41	10.09±1.51	7.41±0.36	24.39±2.82

表 2 各季节浮游动物种类数

Tab.2 Species number composition of the zooplankton community in each season

季节	轮虫	桡足类	枝角类	合计
2017 年秋季	12	2	3	17
2017 年冬季	2	3	0	5
2018 年春季	10	1	1	12
2018 年夏季	13	2	3	18

浮游动物总密度、不同类群浮游动物密度和浮游动物总生物量的季节变化如图2~图4。从浮游动物的种类组成和密度来看，轮虫是该研究区浮游动物群落的主要构成部分；浮游动物密度和生物量季节差异显著 ($P<0.001$)，夏季最高，春、秋季次之，冬季最低。不同类群浮游动物的密度也存在显著的季节变化（$P<0.001$），轮虫密度夏季>秋季>春季>冬季，桡足类密度夏季>春季>冬季>秋季，枝角类密度夏季>秋季>春季（冬季未采集到）。有资料显示（林青等，2014）浮游动物的密度可作为表征河流营养程度的生物指标，标准为贫营养<1 000 个/L，中营养1 000~3 000 个/L，富营养>3 000 个/L，本研究区河流浮游动物的年平均密度为 2 525 个/L，据此判断徐汇区城市河流处于中营养状态。

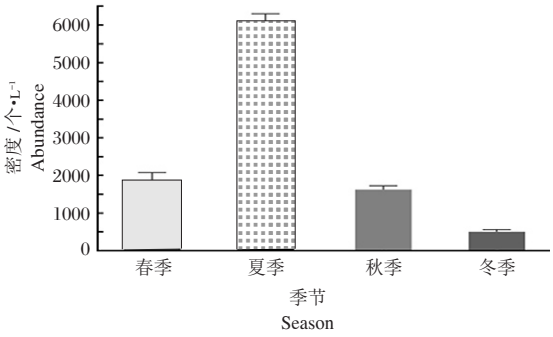


图 2 浮游动物总密度季节变化

Fig.2 Seasonal variation of zooplankton abundance

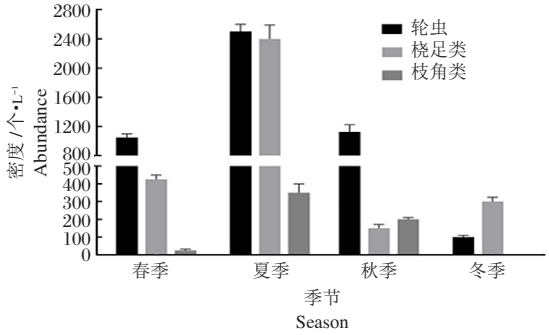


图 3 不同类群浮游动物密度季节变化

Fig.3 Seasonal variation in the zooplankton abundance of different taxa

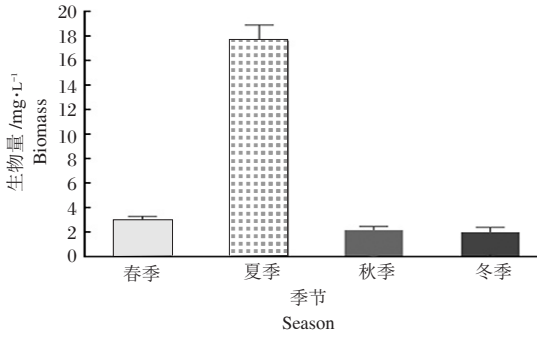


图 4 浮游动物生物量季节变化

Fig.4 Seasonal variation of zooplankton biomass

3.3 浮游动物优势种

研究区内共调查有优势种12种，其中轮虫10种，桡足类1种，枝角类1种。不同类群浮游动物的第1优势种分别为无棘螺形龟甲轮虫（轮虫）、广布中剑水蚤（桡足类）和长额象鼻溞（枝角类）。从各季节来看，秋季的优势种最多，达7种；冬季的最少，仅2种；春夏季分别为4和5种。从不同类群浮游动物的季节优势种分布来看，桡足类的广布中剑水蚤四季均为优势种，轮虫中的萼花臂尾轮虫在夏、秋和冬3季为优势种。另外，红臂尾轮虫是春、夏两季的优势种，但在秋、冬季密度较低。其余优势种只在单个季节分布（表 3）。

表 3 各季节浮游动物优势种及优势度

Tab.3 Dominant species and corresponding dominance of zooplankton in different seasons

优势种	2017年秋		2017年冬		2018年春		2018年夏	
	密度/个·L⁻¹	优势度	密度/个·L⁻¹	优势度	密度/个·L⁻¹	优势度	密度/个·L⁻¹	优势度
长足轮虫 *Rotaria neptuna*					150	0.027		
前额犀轮虫 *Rhinoglena frontalis*					150	0.027		
萼花臂尾轮虫 *Brachionus calyciflorus*	100	0.025	75	0.060			1 100	0.180
角突臂尾轮虫 *B. angularis*							225	0.025
红臂尾轮虫 *B.longirostris*					125	0.033	325	0.044
无棘螺形龟甲轮虫 *Keratella cochlearis tecta*	425	0.262						
热带龟甲轮虫 *K.tropica*							275	0.038
晶囊轮虫 *Asplanchna* sp.	200	0.074						
长三肢轮虫 *Filinia longiseta*	100	0.025						
多肢轮虫 *Polyarthra* sp.	100	0.025						
长额象鼻溞 *Brachionus rubens*	100	0.025						
广布中剑水蚤 *Mesocyclops leuckarti*	100	0.025	250	0.300	425	0.189	2 250	0.369

3.4 浮游动物多样性指数及水质评价

研究区内浮游动物的 Shannon-Wiener 多样性指数 H'、Pielou 多样性指数 J' 和 Margalef 丰富度指数 D 的季节变化见图 5。H' 的变化范围为 1.40~2.49，年均 2.03；D 为 0.64~2.16，年均 1.55；J' 为 0.72~0.88，年均 0.83。H' 和 D 值均为秋季最高、冬季最低；而 J' 值为冬季最高、夏季最低。H' 和 D 的季节差异极显著 ($P<0.001$)，而 Pielou 多样性指数 J' 的季节差异不大。根据 Shannon-Wiener 多样性指数评价法，$0<H'<1$ 为多污型；$1<H'<2$ 为α中污型；$2<H'<3$ 为β中污型；$3<H'<4$ 为寡污型；$H'>4$ 为清洁水体（唐俊等, 2014），研究区内水质春夏秋 3 季属于β中污型，冬季则属于α中污型，总体而言属于β中污型。

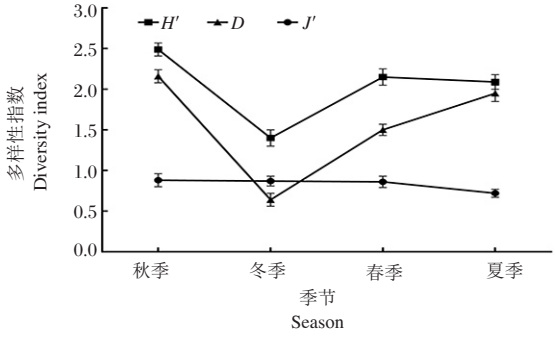


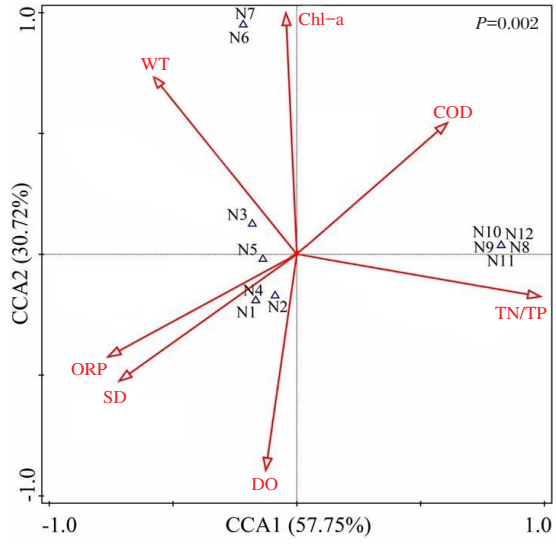
图 5　浮游动物多样性指数季节变化

Fig.5　Seasonal variation of zooplankton diversity indices

3.5 浮游动物与环境因子的关系

为探讨研究区内浮游动物与环境因子的关系，对浮游动物的优势种和环境因子做 DCA 和 CCA 分析。通过 DCA 分析，4 个排序轴中最大梯度值大于 3，因此本研究更适合选用 CCA 分析。Monte Carlo test 表明，第 1 轴和全部轴均呈极显著差异（$P<0.01$），因此 CCA 分析的排序结果是可信的。

CCA 排序图显示（图6），浮游动物群落的分布主要受 Chl-a、氮磷比和 DO 的影响。另外，WT、COD、ORP 和 SD 也是影响浮游动物分布的重要环境因子，但影响力不如 Chl-a、氮磷比和 DO 强。在该研究区的所有浮游动物优势种中，角突臂尾轮虫、热带龟甲轮虫主要受 ORP、DO 和 SD 的影响；萼花臂尾轮虫与 DO 显著正相关，但与 Chl-a 浓度呈显著负相关的关系；红臂尾轮虫的分布受 WT 的影响较大，而广布中剑水蚤与水体 ORP 和 SD 正相关，与 COD 负相关；前额犀轮虫和长足轮虫与 WT 也呈正相关，与 Chl-a 呈极显著正相关；晶囊轮虫、长三肢轮虫、无棘螺形龟甲轮虫、多肢轮虫和长额象鼻溞与 COD 和氮磷比显著正相关，但与 WT、ORP 和 SD 等显著负相关。



N1：角突臂尾轮虫；N2：萼花臂尾轮虫；N3：红臂尾轮虫；N4：热带龟甲轮虫；N5：广布中剑水蚤；N6：前额犀轮虫；N7：长足轮虫；N8：晶囊轮虫；N9：长三肢轮虫；N10：无棘螺形龟甲轮虫；N11：多肢轮虫；N12：长额象鼻溞

图　6 浮游动物与环境因子的 CCA 排序

N1: *Brachionus angularis*; N2: *Brachionus calyciflorus*; N3: *Brachionus rubens*; N4: *Keratella tropica*; N5: *Mesocyclops leuckarti*; N6: *Rhinoglena frontali*; N7: *Rotaria neptuna*; N8: *Asplanchna* sp.; N9: *Filinia longiseta*; N10: *Keratella cochlearis tecta*; N11: *Polyarthra* sp.; N12: *Bosmina longirostris*

Fig.6　Canonical correspondence analysis (CCA) of zooplankton with associated environmental factors

4 讨论

4.1 浮游动物群落结构的变化特征

浮游动物在水生生态系统中占据多个营养级，是连接初级生产者和高级消费者的重要节点，在水域生态理论研究、渔业资源开发、水产养殖、水域环境保护以及水生态系统健康评估等方面发挥着重要作用（Carpenter et al，2006）。近年来，浮游动物群落变化的研究也为水域生态系统的修复和水生生态学的发展提供了理论指导（黄春霞等, 2018）。

上海市徐汇区城市河道研究区内的浮游动物的种类均以小型的轮虫为主。桡足类的广布中剑水蚤四季均有分布，并且在春季、夏季和冬季为第一优势种，其优势度非常高，分别为 0.189、0.369 和 0.300，这和以往的调查结果一致（宋任彬等, 2019）；广布中剑水蚤的优势度在秋季有所下降，其第一优势种的位置被无棘螺形龟甲轮虫所代替。有学者提出桡足类的广布中剑水蚤适宜生活在中度污染水体中（刘歆璞等, 2013），而本次调查区域的水体正处于中度污染状况。同季节不同位点的浮游动物种类组成和丰度无明显差异，考虑与该河道流速较缓且河道周围人类活动差异较小有关，但不同季节浮游动物种

类组成与分布差异显著，这种差异与季节变化导致的水质状态变化密切相关。一般来说，绝大部分敏感浮游动物种类会在水体污染加重时会消失，取而代之的是一些耐污型种类，如椎尾水轮虫和萼花臂尾轮虫等，本研究显示该水体处于中污染状态且全年均有萼花臂尾轮虫分布，这与以往的研究结果一致（许木启, 1996）。同时，研究区的河流位于上海城市中心，人口密集，工商业发达，居民和城市用水需求量大，这给河流的水质、浮游生物以及水生生物的季节变化带来极大的不确定性。

关于淡水浮游动物群落基本结构的调查研究发现，我国乌苏里江、图们江和绥芬河的浮游动物平均丰度在400 个/L 左右，且绝大多数为轮虫，分别为 21 种、14 种和 20 种（姜作发等, 2006）；华北地区的永定河采集到轮虫 24 种，枝角类 16 种，桡足类及其无节幼体 8 种（黎洁等, 2011）；华中地区的湘江，夏季浮游动物群落的丰度最高，该河流优势种为臂尾轮虫和龟甲轮虫（王晓清等, 2013）。俄罗斯的 Latka 河，调查发现 10 种浮游动物，河流不同断面上的浮游动物丰度在 10^3~10^4个/L（Krylov, 2004）。上述报道认为轮虫是河流浮游动物群落最主要的成员，这与本研究河流的调查结果一致。总体上看，我国河流中浮游动物种类数从北往南略有增加，且轮虫是大多数河流浮游动物群落的优势种（Ren et al, 2003）。本研究中，上海市徐汇区城市河流的浮游动物呈现出了较高的生物量，特别是夏季的生物量远远高于国内其他河流，这可能与地质、地貌、用水方式和城市发展有关，任何一条河流均与其他河流存在着明显的差异，从而体现为水生生物物种多样性的差异。

4.2 浮游动物群落与环境因子的相关性

CCA 排序结果显示，氮磷比、溶解氧和Chl-a 浓度是影响该地区浮游动物群落分布的主要环境因子（图 6）。有学者指出，若流域周边用地以居区民、工业区和商业区为主时，径流主要污染物为总氮、总磷等营养盐（刘一等, 2009）。磷是淡水生态系统中营养的主要限制因子，磷的增加促进了水体中藻类的增长，藻类的大量繁殖会消耗水体中的氮，改变了水体中的氮磷比，因此氮磷比是影响浮游植物密度变化和季节演替的关键因子（丰茂武等, 2008），而浮游植物作为浮游动物天然的食物来源，其密度和种类分布势必会对浮游动物产生影响；同时，磷的浓度与水体叶绿素 a 呈正相关关系，而叶绿素 a 是浮游植物生物量的代表参数，所以叶绿素 a 含量对浮游动物分布产生影响，如上海崇明明珠湖浮游动物的分布与叶绿素 a 浓度呈正相关（陈立婧等, 2010）。

溶解氧也是影响水体浮游动物分布的重要环境因子，尤其对轮虫的影响更为显著，主要是由于溶解氧的不足会大大限制轮虫的生长繁殖（刘一等, 2010）。因此，在一定范围内随着溶解氧含量的增加，浮游动物的密度有升高的趋势。另外，水温、水体透明度、ORP 和 COD 等也是影响浮游动物群落分布的重要环境因素。例如，滴水湖浮游动物种类数、丰度和生物量与水温呈正相关，而与透明度呈负相关（林青等, 2014）；杜萍等（2011）的研究发现，水体透明度的降低会减弱浮游植物的有效辐射光强，导致现存浮游植物的数量减少，从而抑制浮游动物生长繁殖的摄食需求；在赣江，水体 COD_{Mn} 与轮虫、枝角类及桡足类呈显著负相关的关系，COD_{Mn} 过高会对喜好清水的轮虫和枝角类起到明显的抑制作用（计勇等, 2012）；Lutz & Winfried（1997）、陈光荣等（2010 ）报道，水温会影响浮游动物的生长、发育和繁殖，是改变其群落结构极为重要的环境因子。褚一凡（2018）研究发现浮游动物优势种的变化受环境因子ORP 的影响最大。除上述环境因子外，水体 pH、沉水植物的种类、生物量和大型水生生物的捕食等因素也会影响浮游动物群落的基本结构。同时，周边城区的施工污染、工业污染、居民生活污染等外源污染的增加也会带来较大影响。

本调查研究表明，徐汇区的河道的水体处于中污染状态，且浮游动物的多样性较低，水体的理化指标波动明显，稳定的食物链和食物网未建立，水体自净化和自维持的能力较弱。要开展河道生态修复工作，有必要在对河道水质数据和生物组成进行综合调查的基础上，继续探索和优化生态修复的技术和方案。水体的理化参数是水质评价的重要指标，但无法全面的反映出水体的生态健康状况，而掌握水生生态系统中生物的组成和分布与环境因子间的相关规律，便可通过生物群落结构的变化对水体的质量和健康状况进行预测，从而为河道修复效果的巩固和进一步治理提供指导。

参考文献

陈光荣, 雷泽湘, 谭镇, 等, 2010. 环境因子对广东城市湖泊后生浮游动物的影响[J]. 水生态学杂志, 3(4): 28-32.

陈立婧, 顾静, 胡忠军, 等, 2010. 上海崇明明珠湖原生动物的群落结构[J]. 水产学报, 34(9): 1404-1413.

褚一凡，2018. 封丘陈桥东湖、青龙湖浮游生物群落时空变化与环境因子的相关分析[D]. 新乡: 河南师范大学.

杜萍, 徐晓群, 刘晶晶, 等, 2011. 椒江口春、秋季浮游动物分

布特征及与主要环境因子的关系[J]. 应用与环境生物学报, 17(4): 486−494.

丰茂武, 吴云海, 冯仕训, 等, 2008 不同氮磷比对藻类生长的影响[J]. 生态环境, 17(5): 1759−1763.

韩茂森, 束蕴芳, 1995. 中国淡水生物图谱[M]. 北京: 海洋出版社:105−112.

黄春霞, 邹丽敏, 赵慧慧, 2018. 上海市青浦区河道浮游动物群落特征调查[J]. 安徽农业科学, 46(19): 76−78.

计勇, 张洁, 孙晓秋, 等, 2012. 赣江中下游浮游动物时空分布特征及水质综合评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 40: 509−513.

蒋燮治, 堵南山, 1979. 中国动物志 (节肢动物门•甲壳纲•淡水枝角类)[M]. 北京: 科学出版社.

姜作发, 唐富江, 董崇智, 等, 2006. 黑龙江水系主要江河浮游动物种群结构特征[J]. 东北林业大学学报, 34(4):64−66.

黎洁, 单保庆, 宋芬, 等, 2011 永定河和滦河水系浮游动物多样性调查与分析[J]. 华中农业大学学报, 30: 768−774.

林青, 由文辉, 徐凤洁, 等, 2014. 滴水湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 34(23): 6918−6929.

刘巧, 刘萌萌, 杨娜, 等, 2019. 杭州湾生物修复区与非修复区浮游植物群落结构比较[J]. 生态学杂志, 38(2): 412−419.

刘歆璞, 王丽卿, 张宁, 等, 2013. 青草沙水库后生浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 32(5): 1238−1248.

刘一, 禹娜, 熊泽泉, 等, 2009. 城区已修复河道冬季浮游动物群落结构的初步研究[J]. 水生态学杂志, 30(3):1−7.

刘一, 禹娜, 冯德祥, 等, 2010. 上海市中心城区河道浮游动物群落结构的周年变化[J]. 生态学杂志, 29(2):370−376.

孟顺龙, 肖代, 陈小丽, 等, 2016. 丰、枯水期里下河腹地典型水体浮游动物群落结构与水质评价[J]. 水生态学杂志, 37(6): 76−83.

沈嘉瑞, 1979. 中国动物志 (节肢动物门•甲壳纲•淡水桡足类)[M]. 北京: 科学出版社.

宋任彬, 潘珉, 何锋, 等, 2019. 滇池流域典型城市河道生态状况调查分析[J]. 环境科学导刊, 38(5): 29−34.

唐俊, 向建国, 谷庞华, 等, 2014 微山湖浮游动物群落结构及水质评价[J]. 水产学杂志, 27(2): 32−37.

王家楫, 1961. 中国淡水轮虫志[M]. 北京: 科学出版社.

王晓清, 曾亚英, 吴含含, 等, 2013. 湘江干流浮游生物群落结构及水质状况分析[J]. 水生生物学报, 37(3):488−494.

许木启, 1996. 从浮游动物群落结构与功能的变化看府河−白洋淀水体的自净效果[J]. 水生生物学, 20(3): 212−220.

徐兆礼, 陈亚瞿, 1989. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲐鲹渔场的关系[J]. 生态学杂志, 8(4):13−15.

Becker V，Huszar V L M，Crossetti L O, 2009. Responses of phytoplankton functional groups to the mixing regime in a deep subtropical reservoir[J]. Hydrobiologia, 628: 137−151.

Carpenter K E, Johnson J M, Buchanan C，2006. An index of biotic integrity based on the summer polyhaline zooplankton community of the Chesapeake Bay[J]. Marine Environmental Research, 62: 165−180.

Gulati R D, 1983. Zooplankton and its grazing as indicators of trophic status in Dutch lakes[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 3(34): 343−354.

Helena B, Pardo R, Vega M, et al, 2000. Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (Pisuerga River, Spain) by principal component analysis[J]. Water Research, 34: 807−816.

Jiang Y J, He W, Liu W X, et al, 2014. The seasonal and spatial variations of phytoplankton community and their correlation with environmental factors in a large eutrophic Chinese lake (Lake Chaohu)[J]. Ecological Indicators, 40: 58−67.

Krylov A V, 2004. Distribution of zooplankton along the longitudinal profile of two disturbed small rivers of the upper Volga basi[J]. Russian Journal of Ecology, 35: 316−323.

Lutz A, Winfried L, 1997. Effects of elevated temperatures on threshold food concentrations and possible competitive abilities of differently sized cladoceran species[J]. Oikos, 79(3): 469−476.

Margalef R, 1958. Information theory in ecology[J]. International Journal of General Systems, 3: 36−71.

Pielou E C, 1966. Species−diversity and pattern−diversity in the study of ecological succession[J]. Journal of Theoretical Biology, 10(2): 370−383.

Piirsoo K, Vilbaste S, Truu J, et al, 2007 Origin of phyto−plankton and the environmental factors governing the structure of microalgal communities in lowland streams [J]. Aquatic Ecology, 41: 183−194.

Ren W W, Zhong Y, Meligrana J, et al, 2003 Urbanization, land use,and water quality in Shanghai 1947−1996[J]. Environment International, 29(5): 649−659.

Walter，1961. Standard methods for the examnation of water and wastewater (11th ed.)[J]. American Journal of Public Health & the Nations Health, 51: 940.

Wilhm J L, 1968. Use of biomass units in Shannon′s Formula [J]. Ecology, 49(1): 153−156.

（责任编辑　郑金秀）

Seasonal Variation of Zooplankton and Its Relationship with Environmental Factors in Urban Rivers of Xuhui District, Shanghai

ZHANG Sheng-man[1,2], HE Pei-min[1,2], LIU Wei[1,2], LIU Jin-lin[1,2], CHEN Si-wei[1,2], HAN Zheng[1,2]
TANG Chun-yu[1,2],TAN Meng[1,2], WU Mei-qin[1,2]

(1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, P.R. China;
2. Water Environment and Ecology Engineering Research Center of Shanghai Institution of Higher Education, Shanghai 201306, P.R. China)

Abstract: To maintain the biodiversity of water bodies and protect aquatic ecosystems, it is important to study the changes and driving factors of the zooplankton community in rivers. In this study, zooplankton community structure and environmental factors in a representative urban river channel of the Xuhui district in Shanghai were monitored from September 2017 to August 2018. Based on the monitoring results, the relationship of the zooplankton community to the environmental factors was examined. We aimed to provide theoretical support for water quality evaluation and ecological monitoring and restoration of urban rivers in Shanghai. During this survey, a total of 32 zooplankton species were collected, including 25 rotifer species, 4 copepod species and 3 cladoceran species, accounting respectively for 78.1%,12.5% and 9.4% of the total species. There were 12 dominant species of zooplankton through the year, including 10 rotifers, 1 copepod and 1 cladoceran. Zooplankton species richness was highest in summer (18 species), followed by autumn (17 species), spring (12 species) and winter (5 species). The environmental factors varied significantly by season, resulting in significant seasonal differences in zooplankton community structure. Zooplankton species richness, abundance and biomass were all highest in summer and the lowest in winter. The Shannon−Wiener diversity (H'), Margalef richness (D) and Pielou evenness (J') indices of the zooplankton community were in the respective ranges of 1.40−2.49, 0.64−2.16, 0.72−0.88, with significant seasonal differences in diversity and richness ($P<0.001$), but variation in the evenness of the zooplankton community was not evident. Canonical correspondence analysis (CCA) of zooplankton and environmental factors showed that the ratio of nitrogen to phosphorus, chlorophyll−a concentration and dissolved oxygen were the significant environmental factors. Finally, water pollution in the river was evaluated using a combination of physical and chemical water quality parameters, diversity indices and dominant zooplankton species, and the results indicate moderate pollution.

Key words: urban river; zooplankton; seasonal variation; environmental factors; canonical correspondence analysis; Shanghai city