

文章编号: 1674-5566(2024)02-0398-11

DOI: 10.12024/jsou.20220303760

## 苏州城区河道大型水生生物分布特征

丁经祥<sup>1</sup>, 栗斌<sup>1</sup>, 郑海粟<sup>2</sup>, 刘金林<sup>1</sup>, 吴庭健<sup>1</sup>, 刘富财<sup>1</sup>, 张晟曼<sup>1</sup>, 何培民<sup>1</sup>

(1. 上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院, 上海 201306; 2. 上海市水生野生动植物保护研究中心, 上海 200092)

**摘要:**为研究苏州城区河道大型水生生物时空分布特征,于2020年5月开始,对苏州古城区主要河道23个断面的大型水生生物及水质指标进行为期1年监测,分析其理化因子时空分布差异,并探讨与大型水生生物相关的影响因素,体现苏州河道水质恢复程度。结果表明,水温、pH、溶解性总固体、电导率、溶解氧、透明度与氨氮在不同月份间呈显著性差异,总氮和总磷在不同月份间具有极显著性差异。研究期间苏州城市河道中共检出5种沉水植物、10种大型底栖无脊椎动物和7种鱼类。其中沉水植物荇菜指数最高,结构最均匀,各断面中沧浪亭桥玛格列夫指数最高,物种最丰富。有无沉水植物分组间流速呈显著性差异,总氮、氨氮存在极显著差异。有无大型底栖无脊椎动物的河道在流速、水深、透明度和溶解氧间存在极显著性差异。按是否存在鱼类对比,水质指标均无显著性差异。冗余分析(RDA)结果也表明,氨氮、水温、溶解氧和透明度是影响城区河道大型水生生物分布的主要水质指标。

**关键词:**苏州城市河道;沉水植物;大型底栖无脊椎动物;鱼类;生物多样性;冗余分析;水生态修复

**中图分类号:** Q 178 **文献标志码:** A

苏州河道众多、河湖串通,水情复杂<sup>[1-2]</sup>。随着苏州经济发展和城市化加速,河道水质一度因工业、生活等超标排放遭受严重污染,虽然近年来采取了一系列减排、控源、截污工程已基本去除黑臭,部分河道依然是V类或劣V类水体<sup>[3-5]</sup>,这导致河道大型水生生物种类单一,物种多样性较差。大型水生生物长期存在于河流中,其多样性和稳定性能客观反映河流的水环境状态<sup>[6]</sup>以及生态完整性<sup>[7]</sup>。例如,大型底栖无脊椎动物作为水体底层重要的定居动物,在水生态系统的物质循环和能量流动方面具有无可替代作用,且很大程度上可以反映区域水系的生态健康水平<sup>[8-9]</sup>。1991年,KARR<sup>[10]</sup>针对鱼类的群落结构以及功能,使用12种生物指标从多方面对河流生态完整性进行评价,设计了IBI评价方法。其中包括RCE<sup>[11]</sup>和RHP<sup>[12]</sup>等水体评价方法,也均使用了鱼类、水生植物等作为主要评价指标。

苏州政府为防汛和提升水质的需要,投入了大量资金<sup>[13]</sup>,并于2018年底至2019年底,对大部

分河道逐级清淤<sup>[14]</sup>。于2020年对苏州城区内河道23个断面开展为期1年,每2个月1次定点采样调查,通过分析各河道的大型水生生物种群分布以及其与水质指标间的关系,探讨河道清淤后大型水生生物物种丰度、多样性与生态恢复现状,期望更全面、准确地以生态学观点来评价和预测河流的水环境状况,为苏州城区河道生态修复工程提供理论依据。

### 1 材料与方法

#### 1.1 研究区域点位设置

研究区域主要为苏州市姑苏区,共选择23条重要河道监测水质指标和大型水生生物指标。根据苏州水系自北向南的流动情况<sup>[15]</sup>,河水主要来自本地降雨,大运河、太湖和阳澄湖水的输入,故选择了主要进水河道胥江、山塘河、上塘河、十字洋河等河道,又选择了外塘河、娄江、大运河支流等主要出水河道作为监测河道,并对苏州旧城区护城河内部的重要景观河道进行了监测。每

收稿日期: 2022-03-08 修回日期: 2022-06-20

基金项目: “十三五”水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07205)

作者简介: 丁经祥(1996—),男,硕士研究生,研究方向为水生态健康。E-mail:582478062@qq.com

通信作者: 何培民, E-mail:pmhe@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

条河道选定 1 个监测断面,共选定 23 个监测断面(图 1),每个断面采用 GPS 记录经纬度坐标。

2020 年 5 月至 2021 年 3 月期间,每 2 个月 1

次监测河道水质和调查河道大型水生生物。每次采样安排在连续晴天、水位较稳定的时间。

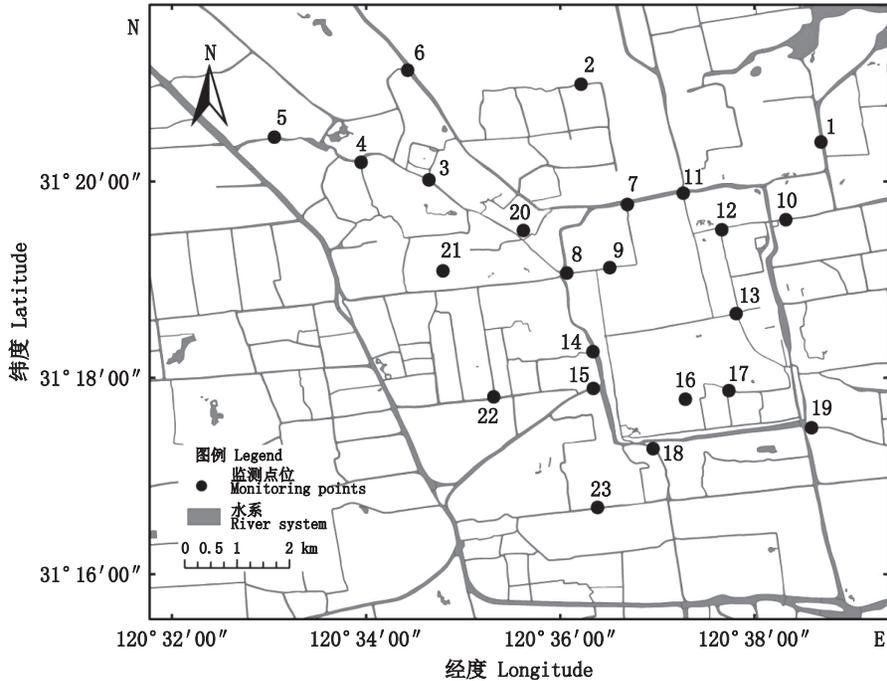


图 1 苏州城区河道监测点位

Fig. 1 Monitoring sites in urban river courses of Suzhou City

1.2 样品采集与处理

沉水植物样本的采集使用 50 cm×30 cm 采草器在每个断面处进行 2~3 次采样,除去枯死枝叶和附着生物,按种分类并称取湿重,精确至 1 g<sup>[16]</sup>。沉水植物种类的定义以 COOK 的概念为准<sup>[17]</sup>。

大型底栖无脊椎动物的调查采用面积为 1/16 m<sup>2</sup> 的彼得逊采泥器在每个断面处抓取 3 个不同位置记为 1 个样品,泥样使用 60 目尼龙筛网筛洗干净,网内留下的残渣装入保鲜袋带回实验室,将沉积物残渣放在解剖盘中,逐一挑出大型底栖无脊椎动物,样本用 10% 的甲醛保存。利用解剖镜和显微镜,将标本鉴定至尽可能低的分类单元<sup>[18-20]</sup>,然后用滤纸吸去表面固定液,置于万分之一电子天平上称重。

采用地笼网和三层刺网进行鱼类样本的采样,地笼网主要用于采集底层鱼类,三层刺网可以采集全水层鱼类。冷冻后带回实验室进行分类、称重及鉴种等工作。物种鉴定主要依据《中国鱼类系统检索》《太湖鱼类志》和《江苏鱼类志》等。所有样品生物量换算成单位面积(m<sup>2</sup>)的个体数及生物量。

采用 Hondex 声呐测深仪测量水深(Depth),透明度(SD)的测算使用萨氏盘,水温(WT)、pH、溶解氧(DO)、电导率(Ec)采用 HACH 便携式多参数水质分析仪。采集水样(每瓶 500 mL),放入低温保温箱,及时运回实验室进行总氮(TN)、总磷(TP)和氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)的测定。所有监测指标均按照国家标准《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)方法监测。其中,TP 采用钼酸铵分光光度法 GB/T 11893—1989 测定<sup>[21]</sup>;TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 HJ 636—2012 测定<sup>[22]</sup>;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 采用纳氏试剂分光光度法 HJ 535—2009 测定<sup>[23]</sup>。

1.3 数据分析

使用 SPSS 24.0 软件进行不同月份间水质指标的单因素方差分析(ANOVA);使用 Origin 2019 分析处理后数据并作图。大型水生生物物种分布与水质指标之间的关系采用 Canoco 5.0 软件的冗余分析(RDA)方法,并采用 Monte Carlo 模拟方法检验环境因子在解释水生生物种群分布时的统计意义。物种丰富度通过计算玛格列夫指数<sup>[24]</sup>表示,物种多样性通过计算辛普森指数<sup>[25]</sup>表示,两指数均采用 biodap 软件进行计算<sup>[26]</sup>。计算

公式:

$$d_{\text{margalef}} = (S-1)/\ln N \quad (1)$$

$$D_{\text{simpson}} = 1 - \sum (N_i/N)^2 \quad (2)$$

式中:  $d_{\text{margalef}}$  为玛格列夫指数;  $D_{\text{simpson}}$  为辛普森指数;  $N$  为总个体数量;  $S$  为总物种数量;  $N_i$  为群落中第  $i$  个物种个体数。

## 2 结果与分析

### 2.1 苏州城市河道大型水生生物

#### 2.1.1 大型水生生物种类组成与生物量

2020年5月至2021年3月期间,在苏州河道共采集到沉水植物5种,分别是菹草(*Potamogeton crispus*)、轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)、苦草(*Vallisneria natans*)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)和水盾草(*Cabomba caroliniana*)。其单位面积年平均生物量为15.59~213.54 g/m<sup>2</sup>,其中水盾草的生物量最大,为213.54 g/m<sup>2</sup>,金鱼藻生物量最小,为15.59 g/m<sup>2</sup>。金鱼藻和苦草出现,表明

苏州河道水质明显得到改善,见表1。

采集到大型底栖无脊椎动物共计10种:铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*)、方形环棱螺(*Bellamya quadrata*)、梨形环棱螺(*Bellamya purificata*)、狭萝卜螺(*Radix lagotis*)、中国圆田螺(*Cipangopaludina chinensis*)、日本沼虾(*Macrobrachium nipponense*)、苏氏尾鳃蚓(*Branchiura sowerbyi*)、克拉泊水丝蚓(*Limnodrilus claparedeianus*)、霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)和蜂蝇幼虫(*Eristalis tenax*)。其单位面积年平均生物量为0~188.55 g/m<sup>2</sup>,其中梨形环棱螺生物量最大,见表1。

采集到鱼类共计7种:蟹(*Hemiculter leucisculus*)、泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus*)、翘嘴鲌(*Culter alburnus*)、鳊鱼(*Rhodeus sinensis*)、鲫(*Carassius auratusgibelio*)、乌鳢(*Ophiocephalus argus*)和沙塘鳢(*Odontobutis obscurus*)。其年平均生物量为0.16~5.38 g/m<sup>2</sup>,其中蟹生物量最大,见表1。

表1 大型水生动物分类及年平均生物量

Tab. 1 Classification and annual average biomass of macroaquatic animals

序号 Number	物种名 Species name	拉丁文学名 Latin scientific name	辛普森指数 $D_{\text{simpson}}$	年平均生物量 Annual average biomass/(g/m <sup>2</sup> )
1	菹草	<i>Potamogeton crispus</i>		78.17
2	轮叶黑藻	<i>Hydrilla verticillata</i>		74.61
3	苦草	<i>Vallisneria natans</i>	$D_1=0.75$	26.19
4	金鱼藻	<i>Ceratophyllum demersum</i>		15.59
5	水盾草	<i>Cabomba caroliniana</i>		213.54
6	日本沼虾	<i>Macrobrachium nipponense</i>		80.60
7	梨形环棱螺	<i>Bellamya purificata</i>		188.55
8	方形环棱螺	<i>Bellamya quadrata</i>		0.24
9	铜锈环棱螺	<i>Bellamya aeruginosa</i>		0.20
10	中国圆田螺	<i>Cipangopaludina chinensis</i>	$D_2=0.62$	13.80
11	狭萝卜螺	<i>Radix lagotis</i>		6.93
12	霍甫水丝蚓	<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>		0.01
13	苏氏尾鳃蚓	<i>Branchiura sowerbyi</i>		0.01
14	克拉泊水丝蚓	<i>Limnodrilus claparedeianus</i>		0*
15	蜂蝇幼虫	<i>Eristalis tenax</i>		0*
16	泥鳅	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>		3.39
17	蟹	<i>Hemiculter leucisculus</i>		5.38
18	翘嘴鲌	<i>Culter alburnus</i>		0.21
19	鳊鱼	<i>Rhodeus sinensis</i>	$D_3=0.46$	0.16
20	鲫	<i>Carassius auratusgibelio</i>		2.93
21	乌鳢	<i>Ophiocephalus argus</i>		2.34
22	沙塘鳢	<i>Odontobutis obscurus</i>		0.45

注:\*表示年平均生物量低于0.004 g/m<sup>2</sup>。

Notes: \* The annual average biomass is less than 0.004 g/m<sup>2</sup>.

### 2.1.2 苏州城市河道水生生物优势种群和分布区特征

23 个断面中有 11 个断面分布有沉水植物(表 2),其中水盾草在除姑胥桥的 10 条河道中均有出现,轮叶黑藻和金鱼藻出现频率次之;沉水植物 6 次采样中,生物量最高值出现在 7 月,每个断面平均为 171.00 g/m<sup>2</sup>,最低值出现在 11 月,为 96.00 g/m<sup>2</sup>,各月份之间生物量差异显著( $P < 0.05$ );苦草仅出现在 7—11 月,其平均生物量为 11.52 ~ 29.74 g/m<sup>2</sup>。其中 10 个断面发现大型底栖无脊椎动物,其中耐污种梨形环棱螺分布最多占比过半(图 2),其次是狭萝卜螺和中国圆田螺组合分布在裕棠桥和沧浪亭;大型底栖无脊椎动物

日本沼虾分布在沧浪亭、泰让桥、齐门桥、华阳桥、盘蠡桥和外塘河大桥,耐污种蝇幼虫仅分布在自由村与裕棠桥,表明底泥受污染较大,或结构更为复杂。鱼类在裕棠桥、中市桥、华阳桥、沧浪亭、花莲桥和外塘河大桥存在,在沧浪亭捕获的鱼类生物量和种类较多,平均生物量 8.54 g/m<sup>2</sup>,其中乌鳢和沙塘鳢等高级鱼类仅在物种丰富的沧浪亭和水系上游外塘河大桥存在。

各断面中外塘河、虎阜大桥、沧浪亭、裕棠桥玛格列夫指数较高,说明有物种丰富度较高,其中沧浪亭尤其突出,其生态结构或许值得进一步研究。沉水植物群落的辛普森指数最大,种群分布更均匀,底栖生物次之,鱼类呈现集中分布现象。

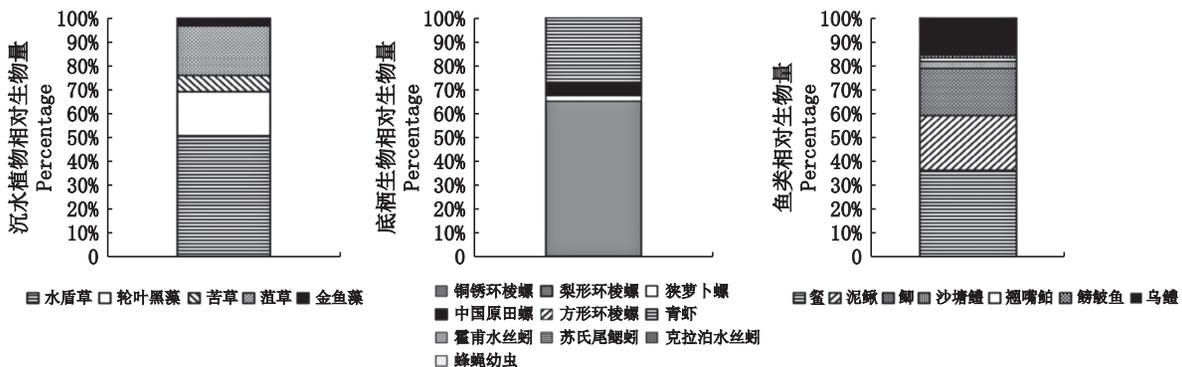


图 2 苏州城区河道大型水生生物分布比例

Fig. 2 Distribution proportion of large aquatic organisms in urban rivers of Suzhou

## 2.2 苏州城市河道水质指标特征

### 2.2.1 水质与环境指标的时空变化

苏州城区河道水质指标变化如表 3 所示,其中水深、流速各月份之间无显著性差异( $P > 0.05$ ),水温、pH、溶解性总固体、电导率、溶解氧、透明度与氨氮在各月份之间呈现出显著性差异( $P < 0.01$ ),总氮和总磷各月份之间具有极显著性差异( $P < 0.01$ )。水温在 1 月最低,为 9.46 °C,最高值在 7 月,为 30.74 °C,其次为 9 月,25.67 °C。透明度在 1 月最高,为 49.74 cm,9 月最低,为 37.34 cm,其次是 5 月,为 40.39 cm,差异极显著。总氮和总磷各月的均值为 2.30 ~ 5.00 mg/L 和 0.23~0.40 mg/L。

### 2.2.2 水质对大型水生动植物分布的影响

按沉水植物、大型底栖无脊椎动物、鱼类,分别根据是否采集到,进行两组水质指标的区分对比。如表 4,流速在有、无沉水植物分布的不同情况下有显著性差异( $P < 0.05$ ),有沉水植物组的氨氮、总氮分别在极显著性水平上( $P < 0.01$ )低于无

沉水植物组。溶氧、透明度、流速、水深在有、无大型底栖无脊椎动物的不同情况下存在极显著性差异( $P < 0.01$ )。鱼类分组中指标均无显著性差异。

### 2.3 环境因子与水生生物群落演替的 RDA 分析

为研究各断面大型水生生物分布与环境因子之间的关系,选取各断面采集样品的生物量作为物种变量,与水质指标进行 RDA 分析(图 3)。

RDA 结果显示金鱼藻分布与水深、透明度和溶解氧呈正相关,其他沉水植物的分布与氨氮、水温呈正相关,其中菹草和苦草的生长与透明度呈正相关(图 3)。底栖生物分布整体上与氨氮呈不同程度负相关,梨形环棱螺与透明度正相关,中国原田螺分布受溶解氧影响更大,铜锈环棱螺能分别适应高总氮浓度和深水环境。与乌鳢、鲫分布呈正相关的指标有 pH、溶解性总固体、流速和透明度,泥鳅和鲃的分布与透明度、溶解氧和总氮呈正相关,而其他指标如氨氮、电导率、总磷、水温则与翘嘴鲌、鳊和沙塘鳢分布正相关。

表2 苏州城市河道各断面大型水生生物出现种类情况  
Tab. 2 Species of large aquatic organisms in various points of urban rivers in Suzhou

序号 Number	断面名称 Sampling point name	沉水植物(种类) Submerged plant (species)	底栖无脊椎动物(种类) Benthic invertebrate (species)	鱼类(种类) Fish (species)	玛格列夫指数 $d_{\text{margalef}}$
1	外塘河大桥	3	4	2	1.69
2	花莲路桥	-	-	3	0.83
3	虎阜大桥	3	5	-	1.49
4	青龙河桥	1	-	-	-
5	自由村桥	-	1	-	-
6	联城桥	-	-	-	-
7	校场桥	3	-	-	0.47
8	阊门	1	2	-	0.67
9	中市桥	1	-	2	0.72
10	娄门桥	2	-	-	0.32
11	齐门桥	2	2	-	0.75
12	华阳桥	-	2	1	0.61
13	兴市桥	-	-	-	-
14	姑胥桥	-	-	-	-
15	泰让桥	2	3	-	1.05
16	沧浪亭桥	3	8	6	2.55
17	银杏桥	-	-	-	-
18	裕棠桥	2	4	1	1.29
19	觅渡桥	-	-	-	-
20	五泾浜闸	-	-	-	-
21	冶坊桥	-	-	-	-
22	胜塘桥	-	-	-	-
23	盘蠡桥	-	1	-	-
	共计	5	10	6	-

注:表中编号与图1一致;表中数据表示该断面共采集到的沉水植物、底栖无脊椎动物和鱼类种类数。

Notes: The number in the table is consistent with Fig.1; The data in the table shows the species of submerged plants, benthic invertebrate and fish collected at the sampling point.

表3 苏州城区河道年水质指标特征  
Tab. 3 Characteristics of annual water quality indexes of rivers in Suzhou City

水质指标 Water quality	202005	202007	202009	202011	202101	202103	<i>P</i>
水温 $WT/^\circ\text{C}$	22.55±0.68	30.75±1.22	25.67±0.42	18.26±0.41	9.46±0.92	14.69±1.41	**
pH	7.76±0.72	7.54±0.14	7.73±0.15	8.01±0.92	7.73±0.25	7.67±0.37	**
溶解性总固体 TDS/(mg/L)	319.91±113.31	311.57±7.01	277.04±112.54	396.00±79.24	265.30±23.56	251.04±15.95	**
电导率 $Ec/(\mu\text{s}/\text{cm})$	627.00±258.93	662.00±96.47	574.87±224.93	618.17±116.53	400.40±55.92	410.57±21.90	**
溶解氧 DO/(mg/L)	3.43±1.24	7.45±5.07	4.92±1.29	6.69±2.30	9.82±6.79	9.59±1.56	**
透明度 SD/cm	46.09±11.62	40.39±9.66	37.35±11.84	49.45±6.85	49.74±7.99	46.13±7.71	**
流速 $Fv/(\text{m}/\text{s})$	0.13±0.17	0.62±0.32	1.25±1.15	2.78±0.31	0.67±0.42	0.34±0.10	
水深 Depth/m	1.73±0.76	2.18±0.59	2.02±0.73	1.87±0.62	1.96±0.61	1.88±0.75	
总氮 TN/(mg/L)	5.00±2.64	3.13±1.30	2.30±1.59	3.47±2.24	3.88±2.07	4.00±1.28	***
总磷 TP/(mg/L)	0.36±0.29	0.24±0.10	0.40±0.11	0.24±0.22	0.23±0.17	0.28±0.15	***
氨氮 $\text{NH}_4^+-\text{N}/(\text{mg}/\text{L})$	1.69±0.97	1.52±0.77	1.61±0.34	1.56±0.48	1.42±0.84	1.53±0.67	**

注:\*\*表示显著性  $P < 0.05$ ;\*\*\*表示显著性  $P < 0.01$ 。

Notes: \*\* ( $P < 0.05$ ) and \*\*\* ( $P < 0.01$ ) mean significant difference within month.

表4 苏州城区河道不同水生生物存在与否时水质的对比  
Tab. 4 Comparison of water quality in Suzhou urban rivers with or without different aquatic organisms

Table with 7 columns: Water quality indicator, Presence of submerged plants (n=44), Absence of submerged plants (n=94), Presence of macrobenthic invertebrates (n=54), Absence of macrobenthic invertebrates (n=84), Presence of fish (n=18), Absence of fish (n=120). Rows include parameters like temperature, pH, TDS, conductivity, DO, transparency, flow velocity, depth, TN, TP, and NH4+-N.

注:根据沉水植物、大型底栖无脊椎动物、鱼类的有与无对比组内环境因子显著性差异,组内分别标记为a和b即为有显著性差异,同时为a则组内无显著性差异。

Notes: According to the presence or absence of submerged plants, macrobenthic invertebrates and fish, and whether there is significant difference in environmental factors in the control group, if it is marked as "a" and "b" respectively, there is significant difference in the group, and if it is marked as "a", there is no significant difference in the group.

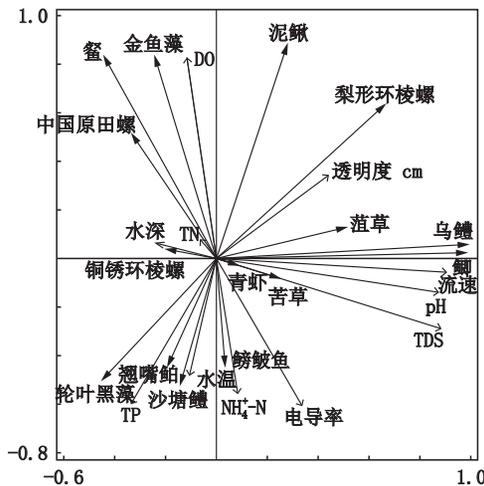


图3 大型水生生物群落与断面的环境因子RDA分析

Fig. 3 RDA analysis of environmental factors in large aquatic communities and sampling sites

3 讨论

3.1 苏州城市河道沉水植物出现标志水质得到逐步改善

沉水植物生长对水环境具有较高的要求,已成为水生生态健康评估的一项关键指标[27-28]。篦齿眼子菜(Potamogeton pectinatus)、穗状狐尾藻(Myriophyllum spicatum)和轮叶黑藻等耐污性较强,一般为沉水植物恢复的先锋种,如果水环境得到改善则金鱼藻、苦草种群可逐步恢复出

现[27]。2018年,苏州市23条城市河道中发现有沉水植物分布生长的河道仅占总河道的23% [28],而2020年23条河道已有11条河道出现了沉水植物,并且有7条河道出现了金鱼藻、苦草种群,这标志着苏州河道水生态环境得到了明显改善。

本研究进一步表明苏州城市河道沉水植物自然分布生长直接受到富营养化程度及透明度双重影响。清水工程实施前,苏州城区河道富营养化比较严重[1,4-5],易造成浮游植物大量生长,甚至出现蓝藻水华[15],从而导致河道水下荒漠化、

沉水植物多样性低<sup>[28-29]</sup>,特别是由于苏州老旧居民住宅还存在化粪池直排河道现象,部分河道依然存在黑臭现象,透明度只有20~50 cm,只能采用生态浮床方法进行生态修复<sup>[1,4]</sup>。经过多年的清水工程改造和生态修复工程实施<sup>[4,14]</sup>,本研究发现沉水植物主要生长在水质较好且流速较快的河道,有沉水植物分布区域的总氮浓度和氨氮浓度显著低于无沉水植物分布区域,说明有沉水植物分布的区域水质条件更好。冗余分析显示透明度与金鱼藻、苦草和菹草分布正相关,特别是金鱼藻、苦草植株一般出现在透明度达到1 m以上的河道,金鱼藻与溶氧密切相关。另外,冗余分析发现不同种类的沉水植物对营养盐浓度具有不同的响应,金鱼藻对总氮、轮叶黑藻和苦草对氨氮有较好耐受性,这与前人结果<sup>[30]</sup>一致。而花莲路桥、银杏桥、姑胥桥等部分区域几乎无沉水植物出现,水质污染依然严重,可见苏州河道生态修复治理工程仍需继续加大力度。

### 3.2 苏州城市河道生态系统中大型水生生物的组成特征

大型底栖无脊椎动物在维持生物多样性和复杂食物网结构,保障生态系统中物质循环和能量流动等方面具有重要的生态功能<sup>[28,31]</sup>。本研究中大型底栖无脊椎动物组成以螺、虾为主,其中以环棱螺属出现较多。从生物功能群角度看,双壳纲软体动物较少<sup>[32]</sup>。大型淡水双壳纲是河道水体中重要的滤食性底栖生物,并且可作为有经济价值的水产渔业资源。戚甫长等<sup>[33]</sup>对3种河蚌的净水效果进行了比较研究,发现河蚌均能有效去除水体中的悬浮物,提高水体透明度,且对总氮去除效果也最好。李雪娟等<sup>[34]</sup>开展了单植不同种类沉水植物及其与螺、蚌组合搭配对水体净化能力的对比研究,发现组合搭配对水质净化效果最佳。

沉水植物、大型底栖无脊椎动物、鱼类间存在互惠关系<sup>[35]</sup>,研究表明前者可通过稳定局部微生境的底质和流速条件,为大型底栖无脊椎动物和鱼类提供适宜的栖息地<sup>[36-37]</sup>。同时,鱼类和螺类可清除植物体表面上的附着藻类,并获取食物来源,从而增加水环境的多样性和复杂性<sup>[38]</sup>。其中沉水植物作为生产者,是水生态系统的重要基础生产者之一,种植沉水植物可以有效降低水体中营养盐浓度,使淡水水体在春季和夏季均保持

良好的水质,不易出现富营养化<sup>[39-40]</sup>。因此需发展以沉水植物为主的水生态系统,同时丰富营养级,完善食物链<sup>[41]</sup>。本研究发现出现沉水植物的11条河道中有8条河道伴随着大型底栖生物或鱼类的出现,仅3条河道未监测到大型水生动物。

### 3.3 水生态系统与水环境的相互作用

大型水生动物与溶解氧有直接正相关关系,且大型底栖无脊椎动物比鱼类更耐受污染环境<sup>[42]</sup>。本研究发现23条河道有10条河道存在大型底栖无脊椎动物,而仅6条河道出现了鱼类,且4条河道是有沉水植物分布的。此外,有大型底栖无脊椎动物的断面TN浓度比无大型底栖无脊椎动物的断面略低;有底栖无脊椎动物的断面溶氧显著低于无底栖组( $P<0.05$ ),这与赵峰等<sup>[43]</sup>的研究结果相符。

大量研究表明,沉水植物是河道生态修复重要物种<sup>[36]</sup>,不但可以通过吸收氮、磷等营养物质改善生态环境,还可以为水生动物提供大量氧气<sup>[44]</sup>。其中苦草是比较理想的生态修复沉水植物候选种<sup>[36]</sup>,苦草叶面积较大,不仅能够提高吸收水体中氮、磷等营养盐的能力,还能够有效降低水体中的悬浮物浓度,从而提高水体的透明度<sup>[45-46]</sup>;同时,苦草的根系较为发达,可以吸收沉积物中的氮、磷存储于体内。在富营养化水体中共同构建螺、蚌、鱼和苦草人工生态系统,不仅可以改善水质,还能促进苦草生长<sup>[47-48]</sup>。因此,在生态修复时建议选用可以同时解决氨氮、溶解氧和透明度等问题的沉水植物苦草<sup>[49-51]</sup>,待沉水植物生长良好后,再以其为主导引入一定的水生动物<sup>[52]</sup>,达到指示并稳固水质效果的同时,还能构建一个健康稳定的水下生态系统。

## 4 总结

为了改变苏州城区河道不佳的生态现状,当前急需基于水草生境营造的生态修复技术,其中最需要解决的是在硬质驳岸和硬质河底上构建以沉水植物为主的生态修复方法,并且为应对大规模水华暴发,还需跟进维护水生植物的生长,以期保护并促进生态系统的构建和稳定。在完成水草生境构建后,仍需要对水生态系统中最重要生物链进行构建完善,在底质较适于软体动物生存的河道中投放适量的大型底栖无脊椎动物,可以完善水体生态系统,最终才能完成城市

河道的人工生态系统构建以及环境与生态的恢复目标。

### 参考文献:

- [1] 付江波, 赵文信, 胡红勇, 等. 苏州市古城区河道水质时空变化分析与评价[J]. 水利科技与经济, 2019, 25(2): 22-27.  
FU J B, ZHAO W X, HU H Y, et al. Spatiotemporal variation and assessment of water quality in rivers of Suzhou ancient city [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2019, 25(2): 22-27.
- [2] DOU P F, ZUO S, REN Y, et al. Refined water security assessment for sustainable water management: a case study of 15 key cities in the Yangtze River Delta, China [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 290: 112588.
- [3] 严佳. 苏州市水环境治理对策及探究[J]. 科学中国人, 2016(9): 192.  
YAN J. Countermeasures and exploration of water environment treatment in Suzhou [J]. Scientific Chinese, 2016(9): 192.
- [4] 孔松, 朱师杰, 秦福军. 苏州某黑臭河道治理经验探讨[J]. 给水排水, 2021, 47(5): 67-71.  
KONG S, ZHU S J, QIN F J. Discussion on experience of a river rehabilitation in Suzhou [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(5): 67-71.
- [5] 朱德龙, 高晓平. 苏州市主要河湖生态现状调查分析[J]. 江苏水利, 2016(6): 41-44.  
ZHU D L, GAO X P. Investigation and analysis of the water ecology for the main rivers and lakes in Suzhou [J]. Jiangsu Water Resources, 2016(6): 41-44
- [6] 朱英. 河流生态健康评价中生物指标的研究与应用——以苏州河水系为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.  
ZHU Y. Research and application of biological index in the river ecosystem health assessment-with Suzhou creek water system for example [D]. Shanghai: East China Normal University, 2008.
- [7] 沈洪艳, 曹志会, 刘军伟, 等. 太子河流域大型底栖动物功能摄食类群与环境要素的关系[J]. 中国环境科学, 2015, 35(2): 579-590.  
SHEN H Y, CAO Z H, LIU J W, et al. Relationship between functional feeding groups of macroinvertebrates and environmental factors in Taizi River basin [J]. China Environmental Science, 2015, 35(2): 579-590.
- [8] 殷旭旺, 李庆南, 朱美桦, 等. 渭河丰、枯水期底栖动物群落特征及综合健康评价[J]. 生态学报, 2015, 35(14): 4784-4796.  
YIN X W, LI Q N, ZHU M H, et al. Community structure and biological integrity of macroinvertebrates in the wet and dry seasons of Wei River basin, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4784-4796.
- [9] 张远, 徐成斌, 马溪平, 等. 辽河流域河流底栖动物完整性评价指标与标准[J]. 环境科学学报, 2007, 27(6): 919-927.  
ZHANG Y, XU C B, MA X P, et al. Biotic integrity index and criteria of benthic organisms in Liao River Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(6): 919-927.
- [10] KARR J R. Biological integrity: a long-neglected aspect of water resource management [J]. Ecological Applications, 1991, 1(1): 66-84.
- [11] ROBERT C, PETERSEN J R. The RCE: a riparian, channel, and environmental inventory for small streams in the agricultural landscape [J]. Freshwater Biology, 1992, 27(2): 295-306.
- [12] WADESON R A, ROWNTREE K M. A hierarchical geomorphological model for the classification of South African River Systems [M]//UYS M C. Classification of Rivers and Environmental Health Indicators. Proceedings of a Joint South African/Australian Workshop. Pretoria: Water Research Commission.
- [13] 倪洁. 苏州城区河道保洁财政支出绩效评价研究——基于 2015-2019 年数据分析[D]. 苏州: 苏州大学, 2020.  
NI J. Research on the performance evaluation of financial expenditure of river cleaning in Suzhou Urban area: Based on data analysis from 2015 to 2019 [D]. Suzhou: Soochow University, 2020.
- [14] 王朝勇, 程颖, 余歆睿, 等. 苏州市中心城区清水工程水环境改善研究[J]. 水利规划与设计, 2019(9): 8-9, 96.  
WANG C Y, CHENG Y, YU X R, et al. Study on water environment improvement of clear water project in downtown area of Suzhou city [J]. Water Resources Planning and Design, 2019(9): 8-9, 96.
- [15] 马婕, 申利亚, 何培民, 等. 苏州城区河道浮游植物功能群演替特征及其对环境因子的响应[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(1): 103-112.  
MA J, SHEN L Y, HE P M, et al. Succession characteristics and responses to environmental factors of phytoplankton functional groups in river courses in the urban area of Suzhou City [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2021, 30(1): 103-112.
- [16] 郭超, 李为, 李诗琦, 等. 盐龙湖沉水植物群落变化规律及其驱动因子研究[J]. 水生态学杂志, 2021, 42(6): 34-40.  
GUO C, LI W, LI S Q, et al. Succession and driving factors of submerged macrophytes in Yanlong Lake [J]. Journal of Hydroecology, 2021, 42(6): 34-40.

- [17] COOK C D K. Aquatic plant book [M]. Amsterdam: SPB Academic Publishing, 1996.
- [18] MORSE J C, YANG L F, TIAN L X. Aquatic insects of China useful for monitoring water quality [M]. Nanjing: Hohai University Press, 1994.
- [19] 许浩, 蔡永久, 汤祥明, 等. 太湖大型底栖动物群落结构与水环境生物评价[J]. 湖泊科学, 2015, 27(5): 840-852.  
XU H, CAI Y J, TANG X M, et al. Community structure of macrozoobenthos and the evaluation of water environment in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(5): 840-852.
- [20] 刘文亮. 长江河口大型底栖动物及其优势种探讨[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.  
LIU W L. The benthic macro-invertebrates and dominant groups identification in the Yangtze Estuary [D]. Shanghai: East China Normal University, 2007.
- [21] 陈荷生, 宋祥甫, 邹国燕. 利用生态浮床技术治理污染水体[J]. 中国水利, 2005(5): 50-53.  
CHEN H S, SONG X F, ZOU G Y. Treatment in water bodies pollution by ecological floating bed technology [J]. China Water Resources, 2005(5): 50-53.
- [22] 李英杰, 年跃刚, 胡社荣, 等. 生态浮床对河口水质的净化效果研究[J]. 中国给水排水, 2008, 24(11): 60-63, 67.  
LI Y J, NIAN Y G, HU S R, et al. Purification effect of ecological floating bed on water quality of an estuary [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(11): 60-63, 67.
- [23] 杨婷婷, 操家顺, 周勇, 等. 原位围隔耐寒高羊茅浮床对苏州重污染河道水体的净化[J]. 湖泊科学, 2007, 19(5): 618-621.  
YANG T T, CAO J S, ZHOU Y, et al. Purification effect of cold-tolerant *Festuca arundinacea* in heavy polluted river, Suzhou [J]. Journal of Lake Sciences, 2007, 19(5): 618-621.
- [24] 章飞军, 童春富, 谢志发, 等. 长江口潮间带大型底栖动物群落演替[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 4944-4952.  
ZHANG F J, TONG C F, XIE Z F, et al. The recolonisation progress of intertidal benthic fauna community in the Changjiang Estuary [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 4944-4952.
- [25] 王学涛. 基于环境DNA宏条形码的热带西太平洋和南极半岛邻近海域底栖生物多样性研究[D]. 青岛: 自然资源部第一海洋研究所, 2021.  
WANG X T. Benthic biodiversity in the tropical Western Pacific and the ocean adjacent to Antarctic Peninsula revealed with environmental DNA metabarcoding [D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, MNR, 2021.
- [26] 张婷婷, 高宇, 王思凯, 等. 河口湿地景观格局与大型底栖生物群落的尺度效应研究[J]. 海洋渔业, 2018, 40(6): 679-690.  
ZHANG T T, GAO Y, WANG S K, et al. Landscape pattern of estuarine wetland and its multi-scale effects on macrobenthos diversity [J]. Marine Fisheries, 2018, 40(6): 679-690.
- [27] 王琦, 高晓奇, 杨红军, 等. 滇池沉水植物分布区域水环境现状与健康评价[J]. 生态环境学报, 2017, 26(8): 1392-1402.  
WANG Q, GAO X Q, YANG H J, et al. Present water environment and water health assessment of distribution area of submerged plants in Dianchi Lake [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(8): 1392-1402.
- [28] 王秀云. 城市水体生态健康评价体系的研究——以苏州市为例[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.  
WANG X Y. Research on urban water body ecological health evaluation system; Take Suzhou as an example [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020.
- [29] 任文君, 田在锋, 宁国辉, 等. 4种沉水植物对白洋淀富营养化水体净化效果的研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(2): 345-352.  
REN W J, TIAN Z F, NING G H, et al. Purification efficiency of four species submerged macrophytes for the eutrophic water in Baiyangdian Lake [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(2): 345-352.
- [30] 郭凯迪, 张晓波, 刘培中, 等. 西洞庭湖沉水植物分布格局对环境因子及水文情势差异的响应[J]. 湖泊科学, 2020, 32(6): 1736-1748.  
GUO K D, ZHANG X B, LIU P Z, et al. The response of submerged plants to different environmental factors and hydrologic regime in West Lake Dongting [J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(6): 1736-1748.
- [31] YANG L, HE H, GUANG B H, et al. Mesocosm experiment reveals a strong positive effect of snail presence on macrophyte growth, resulting from control of epiphyton and nuisance filamentous algae: Implications for shallow lake management [J]. Science of the Total Environment, 2020, 705: 135958.
- [32] 薛涛涛, 刘雄军, 武瑞文, 等. 太湖蚌类现存量及空间分布格局[J]. 湖泊科学, 2019, 31(1): 202-210.  
XUE T T, LIU X J, WU R W, et al. Standing stock and spatial distribution pattern of unionids in Lake Taihu, China [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(1): 202-210.
- [33] 戚甫长, 王琪, 朱凌云, 等. 三种河蚌对富营养化水体的处理效果研究[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(20): 47-49.  
QI F Z, WANG Q, ZHU L Y, et al. Study on the treatment effect of three kinds of mussels on the treatment of eutrophic water [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2019, 58(20): 47-49.

- [34] 李雪娟,和树庄,常学秀,等. 螺蚌和沉水植物搭配对微污染水体的净化作用[J]. 环境工程学报, 2016, 10(1): 95-102.  
LI X J, HE S Z, CHANG X X, et al. Role of snails, mussels and submerged plants in purifying micro-polluted water[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(1): 95-102.
- [35] 王瑜,刘录三,舒俭民,等. 白洋淀围隔中不同生物组合调控水质实验[J]. 湿地科学, 2013, 11(3): 359-365.  
WANG Y, LIU L S, SHU J M, et al. In situ enclosure experiment on influence of different biological combination on water quality in Baiyangdian Lake [J]. Wetland Science, 2013, 11(3): 359-365.
- [36] 李鹤男,孙永利,李鹏峰,等. 沉水植物水体底质生态修复研究进展[J]. 中国环保产业, 2021(11): 37-41.  
LI H N, SUN Y L, LI P F, et al. Research progress on the ecological remediation of water sediment by submerged plants[J]. China Environmental Protection Industry, 2021(11): 37-41.
- [37] 张军旺,谢骏,李志斐,等. 鲃鯿淀不同沉水植被盖度下夏秋季底栖动物群落结构及变化规律[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(1): 107-118.  
ZHANG J W, XIE J, LI Z F, et al. Zoobenthos community structure and variation under different submerged macrophyte coverage in Shihoudian sub-lake in summer and autumn [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 31(1): 107-118.
- [38] 渠晓东,余杨,张敏,等. 城市河流沉水植物与大型底栖动物群落的关系[J]. 环境科学, 2018, 39(2): 783-791.  
QU X D, YU Y, ZHANG M, et al. Relationship between macrophyte communities and macroinvertebrate communities in an urban stream [J]. Environmental Science, 2018, 39(2): 783-791.
- [39] 金树权,周金波,包薇红,等. 5种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较[J]. 环境科学, 2017, 38(1): 156-161.  
JIN S Q, ZHOU J B, BAO W H, et al. Comparison of nitrogen and phosphorus uptake and water purification ability of five submerged macrophytes [J]. Environmental Science, 2017, 38(1): 156-161.
- [40] HILT S, ALIRANGUES NUÑEZ M M, BAKKER E S, et al. Response of submerged macrophyte communities to external and internal restoration measures in North Temperate Shallow Lakes [J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 194.
- [41] 韩政,汤春宇,邵留,等. 多营养层级淡水生态系统构建对微生物的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(3): 575-585.  
HAN Z, TANG C Y, SHAO L, et al. The effect of multi-trophic freshwater ecosystem construction on microorganisms [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2023, 32(3): 575-585.
- [42] 张跃平. 江苏大型底栖无脊椎动物耐污值、BI指数及水质生物评价研究[D]. 南京:南京农业大学, 2006.  
ZHANG Y P. A study on tolerance value of benthic macroinvertebrates and biotic index in Jiangsu province [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006.
- [43] 赵峰,谢从新,张念,等. 不同密度梨形环棱螺对养殖池塘水质及沉积物氮、磷释放的影响[J]. 水生态学杂志, 2014, 35(2): 32-38.  
ZHAO F, XIE C X, ZHANG N, et al. Efficiency of water purification and the nitrogen and phosphorous release of the sediment by different densities of *Bellamya purificata* [J]. Journal of Hydroecology, 2014, 35(2): 32-38.
- [44] 王桂萍. 五种沉水植物光合作用放氧速度的比较[J]. 山东师大学报(自然科学版), 1994, 9(2): 134-137.  
WANG G P. Comparison of oxygen release rate in photosynthesis of five submerged plants [J]. Journal of Shandong Normal University (Natural Science), 1994, 9(2): 134-137.
- [45] 尚媛媛,关保华,郑建伟,等. 沉水植物苦草和轮叶黑藻对水环境的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(28): 155-159.  
SHANG Y Y, GUAN B H, ZHENG J W, et al. *Vallisneria natans* and *Hydrilla verticillata*: the influence on water environment [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(28): 155-159.
- [46] 曹响,王国祥,黄齐. 人工湿地改善长江水体透明度的示范研究[J]. 人民长江, 2009, 40(20): 85-87.  
CAO Y, WANG G X, HUANG Q. Demonstration research on improvement in water transparency of the Yangtze River by artificial wetland [J]. Yangtze River, 2009, 40(20): 85-87.
- [47] 罗丛强,蒋东利,雷澄,等. 富营养化水体中铜锈环棱螺促进苦草生长和水质改善研究[J]. 环境生态学, 2020, 2(6): 27-33.  
LUO C Q, JIANG D L, LEI C, et al. *Bellamya aeruginosa* promote the growth of *Vallisneria natans* and improve water quality in high nutrient environment [J]. Environmental Ecology, 2020, 2(6): 27-33.
- [48] 李萍,张修峰,莫树青. 背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)、苦草(*Vallisneria natans*)及其共存对水质的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(6): 1589-1594.  
LI P, ZHANG X F, MO S Q. Effects of mussel (*Anodonta woodiana*), submerged macrophyte (*Vallisneria natans*) and their coexistence on water quality [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(6): 1589-1594.
- [49] 王沛芳,王超,王晓蓉,等. 苦草对不同浓度氮净化效果及其形态转化规律[J]. 环境科学, 2008, 29(4): 890-895.  
WANG P F, WANG C, WANG X R, et al. Purification

- effects on nitrogen under different concentration and nitrogen conformation transform principles by *Vallisneria spiralis* L. [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(4): 890-895.
- [50] 李启升, 黄强, 李永吉, 等. 水深对沉水植物苦草 (*Vallisneria natans*) 和穗花狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum*) 生长的影响[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(4): 1045-1054.
- LI Q S, HUANG Q, LI Y J, et al. Effects of water depth on growth of submerged macrophytes *Vallisneria natans* and *Myriophyllum spicatum* [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(4): 1045-1054.
- [51] 李振国, 王国祥, 夏劲, 等. 沉水植物对水-沉积物扩散边界层氧气垂直分布特征的影响[C]//中国海洋湖沼学会第十次全国会员代表大会暨学术研讨会论文集. 青岛: 中国海洋湖沼学会, 中国科学院海洋研究所, 2012: 78.
- LI Z G, WANG G X, XIA J, et al. Effect of submerged plants on vertical distribution characteristics of oxygen in water sediment diffusion boundary layer [C]//Proceedings of the 10th National Member Congress and Academic Seminar of China Ocean and Limnology Society. Qingdao, 2012: 78.
- [52] 薛同来, 佟素娟, 张为堂, 等. 水生生物群落结构完整性对水环境的影响[J]. *北京工业大学学报*, 2016, 42(10): 1540-1546.
- XUE T L, TONG S J, ZHANG W T, et al. Effect of aquatic communities' integrity on water environment [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2016, 42(10): 1540-1546.

## Distribution characteristics of large aquatic organisms in Suzhou urban rivers

DING Jingxiang<sup>1</sup>, LI Bin<sup>1</sup>, ZHENG Haisu<sup>2</sup>, LIU Jinlin<sup>1</sup>, WU Tingjian<sup>1</sup>, LIU Fucui<sup>1</sup>, ZHANG Shengman<sup>1</sup>, HE Peimin<sup>1</sup>

(1. College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Aquatic Wildlife Conservation and Research Center, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to study the temporal and spatial distribution characteristics of large aquatic organisms in Suzhou urban rivers, this study began in May 2020, monitored the large aquatic organism indexes and water quality indexes of 23 sections of the main rivers in Suzhou ancient city area for one year, analyzed the temporal and spatial distribution differences of physical and chemical factors, and discussed the influencing factors related to large aquatic organisms to reflect the restoration degree of Suzhou rivers. The results showed that water temperature, pH, TDS, conductivity, dissolved oxygen, transparency and ammonia nitrogen had significant differences in different months, and total nitrogen and total phosphorus had extremely significant differences in different months. During the study period, a total of 5 species of submerged plants, 10 species of macrobenthic invertebrates and 7 species of fish were detected in the urban rivers of Suzhou. Among them, the Simpson index of submerged plants was the highest and the structure was the most uniform. In each section, the margalef index of canglangting bridge was the highest and the species were the most abundant. There were significant differences in flow rate, total nitrogen and ammonia nitrogen between groups with and without submerged plants. According to the presence or non-absence of macrobenthic invertebrates, there were very significant differences in velocity, water depth, transparency and dissolved oxygen; According to the presence or non-absence of fish, there was no significant difference in water quality indicators. The results of redundancy analysis (RDA) also showed that ammonia nitrogen, water temperature, dissolved oxygen and transparency were the main water quality indicators affecting the distribution of large aquatic organisms in urban rivers.

**Key words:** Suzhou urban river; submerged plant; macrobenthic invertebrate; fish; biodiversity; redundancy analysis; water environment restoration