

长江朝天门至涪陵段夏季浮游生物群落结构特征及水质评价*

彭健渝, 何瑞琪, 段雨池, 李英文, 陈启亮

(重庆师范大学 生命科学学院 重庆市动物生物学重点实验室, 重庆 401331)

摘要:调查长江朝天门至涪陵段(后简称朝涪段)夏季浮游生物群落结构特征并评价该江段水质及水体营养状态。于 2022 年 5 月在朝涪段设置 9 个采样点采集水样,测定水质理化指标,鉴定浮游生物的种类组成并计算它们的密度、生物量、多样性指数及优势度指数。结果显示:1)朝涪段水体中溶解氧含量、总磷含量、氨氮含量、化学需氧量等理化指标符合 II 类水标准,水质良好。2)在朝涪段共检测到浮游植物 5 门 43 属 115 种,以硅藻门(Bacillariophyta)和绿藻门(Chlorophyta)物种为主,浮游植物的平均密度及平均生物量分别为 $5.45 \text{ 万个} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.1892 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;共检测到浮游动物 4 门(类)33 属 50 种,其中原生动物门(Protozoa)物种数占比最高,浮游动物的平均密度及平均生物量分别为 $16.8 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.0983 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。3)各采样点浮游植物 Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数和 Pielou 指数的平均值分别为 3.2754、7.7482 和 0.9660;各采样点浮游动物上述多样性指数的平均值分别为 2.2815、3.7802 和 0.9053。4)在朝涪段共检测到浮游生物优势种 19 种,其中浮游植物 10 种、浮游动物 9 种;基于浮游生物多样性指数的水质评价结果表明朝涪段夏季水质类型为轻污染至 β -中污染。上述结果提示朝涪段水质状况总体良好,水体营养状态为贫营养状态,浮游生物群落组成较为稳定。

关键词:浮游生物;水质;营养状况;群落特征;长江

中图分类号:Q175

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2024)06-0076-10

浮游生物是指悬浮生活在水中的水生生物,主要包括浮游植物和浮游动物^[1]。大部分浮游生物个体微小,需要在显微镜下仔细观察才能发现;仅有少部分种类如桡足类(Copepoda)、枝角类(Cladocera)和大型藻类为肉眼可见^[2]。浮游生物作为水生生态系统中主要生产者和重要消费者,是能量流动与物质循环的基础,是衔接上行效应和下行效应的关键枢纽^[3],对维持水生生态系统的平衡及健康具有重要意义。浮游生物具有对水环境中各种因素变化十分敏感的特点^[4],水体中理化因子的细微变化均可能引起浮游生物的密度、生物量、多样性指数等指标的改变。因此,在水质、水环境健康及营养状况评价中常常涉及对浮游生物群落结构及相关指标的考察^[5-6]。

长江朝天门至涪陵段(后简称朝涪段)是长江上游航道的重要组成部分,该江段也是长江鱼类重要的栖息地。其中,由重庆市南岸区广阳镇至重庆市涪陵区南沱镇长约 127 km 的江段为长江重庆段四大家鱼国家级水产种质资源保护区,对四大家鱼及珍稀特有鱼类的生长和繁育十分重要。为推进长江航运高质量发展从而更好地服务长江经济带发展战略,目前朝涪段正在实施航道整治工程。在航道整治过程中,疏浚、爆破作业等涉水施工对水生生物及生境的影响较大^[7-11]。本研究于 2022 年 5 月对朝涪段水质理化指标及浮游生物群落结构进行调查,旨在为朝涪段航道整治工程对水环境及水生生物的影响评价提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 采样时间及位点

根据朝涪段的水文特点及环境状况,结合航道整治工程主要清礁及疏浚位点,本研究在 2022 年 5 月于朝涪段共设置了 9 个采样点进行采样,采样点的名称和位置如图 1 所示。

1.2 样品采集与分析

1.2.1 浮游生物样品的采集与鉴定

浮游生物的定量、定性样品采集顺序为先采定量样品再采定性样品,以避免定性样品的采集过程对定量样

* 收稿日期:2023-11-30 修回日期:2024-04-06 网络出版时间:2024-12-25T15:41

资助项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 31901183);重庆市自然科学基金面上项目(No. CSTB2023NSCQ-MSX0754)

第一作者简介:彭健渝,女,研究方向为水域生态学,E-mail:1415713099@qq.com;通信作者:陈启亮,男,博士,教授,E-mail:qlchen@cqnu.edu.cn

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.n.20241225.1009.012

品分析结果产生影响;2 类样品的采集方法参照《淡水浮游生物研究方法》^[12]和《长江水生生物资源监测手册》^[13],具体内容如下。

1) 浮游植物的定量样品采集方法为:取水面以下 50 cm 处水样 1 L,加入 10 mL 鲁哥氏液固定后带回实验室,经沉淀、浓缩后弃上清液,取剩余 30~50 mL 浓缩水样进行分析。浮游植物的定性样品采集方法为:使用 25 号浮游生物网采集,将网口置于水面以下 40~50 cm 处以“∞”形来回拖动采集网约 3~5 min,然后将滤取的样品转入标本瓶中,加入体积为 1%~1.5%水样体积的鲁哥氏液进行固定,然后带回实验室在显微镜下进行观察鉴定。

2) 浮游动物的定量样品采集方法为:取水面以下 50 cm 处水样 20 L,用 25 号浮游生物网过滤,向滤液中加入体积为 5%水样体积的甲醛溶液(甲醛体积分数为 30%~40%)固定。浮游动物的定性样品采集方法与浮游植物的定性样品采集方法类似。

浮游生物的鉴定及定量分析主要参考《淡水浮游生物研究方法》^[12]《中国淡水藻类:系统、分类及生态》^[14]《中国淡水生物图谱》^[15]等资料来进行。

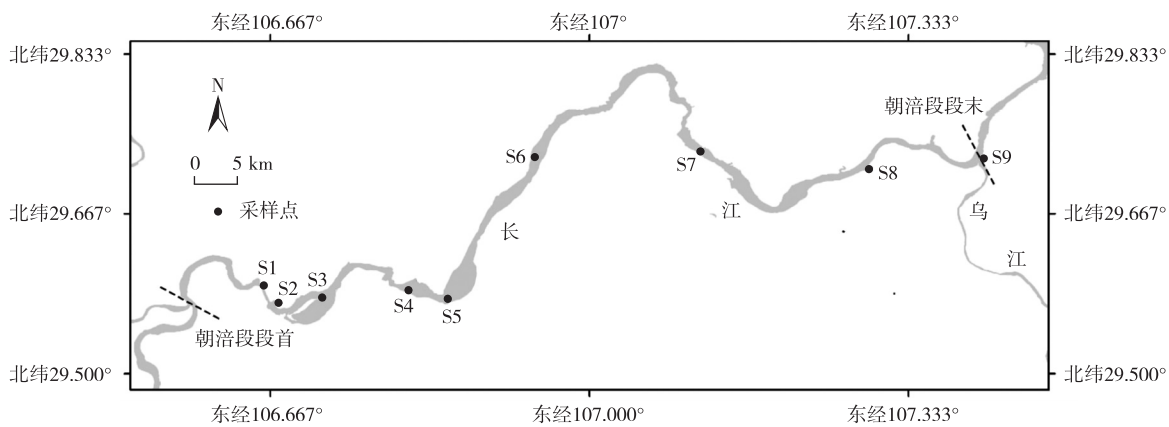


图 1 采样点分布
Fig. 1 The distribution of sampling sites

1.2.2 水质理化指标测定

水温和溶解氧质量浓度使用哈纳 HI98193 型便携式溶解氧测定仪进行测定;pH 和电导率分别用希玛 pH828 便携式 pH 计和速为 SW301 型电导率仪进行测定;总磷、氨氮的质量浓度及化学需氧量均使用浙江陆恒环境科技有限公司生产的测试包进行检测。

1.3 数据处理与分析

浮游生物的 Shannon-Wiener 指数(H')、Margalef 指数(D)、Pielou 指数(J)和优势度指数的计算均参考《长江水生生物资源监测手册》^[13]。

采用 H' 、 D 和 J 对水质类型进行评价,采用浮游生物的密度、生物量对水体营养状态进行评价^[16-18],具体评价标准见表 1、表 2。

表 1 浮游生物多样性指数与水质类型的关系

Tab. 1 The relationship between the plankton diversity index and the water quality type							
水质类型	H'	D	J	水质类型	H'	D	J
清洁	≥ 4.0	≥ 4.0	0.8~1.0	α -中污染	1.0~2.0	1.0~2.0	$>0.3\sim0.4$
轻污染	$>3.0\sim<4.0$	$>3.0\sim<4.0$	$>0.5\sim0.8$	重污染	<1.0	<1.0	0~0.3
β -中污染	$>2.0\sim3.0$	$>2.0\sim3.0$	$>0.4\sim0.5$				

2 结果与分析

2.1 水质理化指标

表 3 显示:各采样点水样的 pH 差异不大,平均 pH 为 8.08,故朝天门至涪陵段水体属于弱碱性水体;各采样点水样的

溶解氧质量浓度均较高,平均溶解氧质量浓度为 $7.90\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;各采样点水样的平均水温为 $20.68\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均电导率为 $360.97\text{ }\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$;除 S2 和 S9 采样点水样的氨氮质量浓度相对较高外,其余采样点水样氨氮质量浓度均较低;同时,各采样点水样的总磷质量浓度均在同一范围内,它们的化学需氧量也在同一范围内。根据《地表水环境质量标准(GB 3838—2002)》^[19],上述水质理化指标检测结果显示朝涪段水体为Ⅱ类水,水质良好。

表 2 浮游生物的密度、生物量与水体营养状态的关系
Tab. 2 The relationship between the density and biomass of plankton and the trophic state of water bodies

营养类型	浮游植物密度/ (万个 $\cdot\text{L}^{-1}$)	浮游植物生物量/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	浮游动物密度/ (个 $\cdot\text{L}^{-1}$)	浮游动物生物量/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
贫营养型	<30	<1.0	<1 000	<1.0
中营养型	30~100	3.0~5.0	1 000~3 000	1.0~3.0
富营养型	>100	>7.0	>3 000	>3.0

注:此表依据文献[17]所制,并结合本研究实际情况进行了适当调整。

表 3 朝涪段水质理化指标
Tab. 3 The physical and chemical indexes of water quality in the Chaotianmen to Fuling section

采样点	pH	溶解氧质量 浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	电导率/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	水温/ $^{\circ}\text{C}$	总磷质量 浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	氨氮质量 浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	化学需氧量/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
S1	8.10	7.78	359.9	20.6	<0.05	<0.05	1~5
S2	8.11	7.53	360.0	20.6	<0.05	0.05~0.10	1~5
S3	8.10	7.76	360.7	20.7	<0.05	<0.05	1~5
S4	8.08	7.79	361.6	20.7	<0.05	<0.05	1~5
S5	8.08	7.96	361.2	20.7	<0.05	<0.05	1~5
S6	8.07	8.07	362.5	20.9	<0.05	<0.05	1~5
S7	8.08	8.08	367.8	21.0	<0.05	<0.05	1~5
S8	8.06	8.06	366.1	20.8	<0.05	<0.05	1~5
S9	8.08	8.08	348.9	20.1	<0.05	0.05~0.10	1~5

2.2 浮游生物群落结构特征

2.2.1 浮游植物的种类组成、密度和生物量

在朝涪段共检测到浮游植物 5 门 43 属 115 种,其中:硅藻门(Bacillariophyta)物种有 73 种,绿藻门(Chlorophyta)物种有 32 种,蓝藻门(Cyanophyta)物种有 8 种,甲藻门(Dinophyta)和裸藻门(Euglenophyta)物种各只有 1 种。朝涪段各类浮游植物的物种数占比如图 2a 所示。由图 2b 可知:硅藻门的密度及生物量均为最高,分别为 $40.37\text{ 万个}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.413\text{ 7 mg}\cdot\text{L}^{-1}$;绿藻门的密度及生物量次之;蓝藻门、裸藻门及甲藻门的密度及生物量均较低。

朝涪段各采样点检测到的浮游植物物种数差异不大,介于 39~50 种之间,平均为 45.2 种(图 3a)。然而,不同采样点浮游植物的密度及生物量差异较大(图 3b),其中:密度最大和最小的采样点分别为 S1($9.20\text{ 万个}\cdot\text{L}^{-1}$)和 S7($3.64\text{ 万个}\cdot\text{L}^{-1}$);生物量最大和最小的采样点分别为 S6($0.439\text{ 9 mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和 S7($0.052\text{ 5 mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。总体上看,朝涪段 9 个采样点浮游植物的平均密度及平均生物量分别为 $5.45\text{ 万个}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.189\text{ 2 mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

2.2.2 浮游动物的种类组成、密度和生物量

经检测,朝涪段的浮游动物共有 4 门(类)33 属 50 种,其中:原生动物门(Protozoa)物种有 19 种,轮虫类(Rotifer)物种有 13 种,枝角类(Cladocera)和桡足类(Copepods)物种各有 9 种。各类浮游动物物种数占比见图 4a。图 4b 显示:朝涪段浮游动物密度最大的是原生动物门($95\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$),其次是桡足类($40\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$),再次是轮虫类($11\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$),最小的是枝角类($5\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$);而该江段浮游动物生物量最大的是桡足类($0.711\text{ 4 mg}\cdot\text{L}^{-1}$),其次是枝角类($0.095\text{ 7 mg}\cdot\text{L}^{-1}$),再次是原生动物门($0.068\text{ 6 mg}\cdot\text{L}^{-1}$),最小的是轮虫类($0.009\text{ 1 mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。

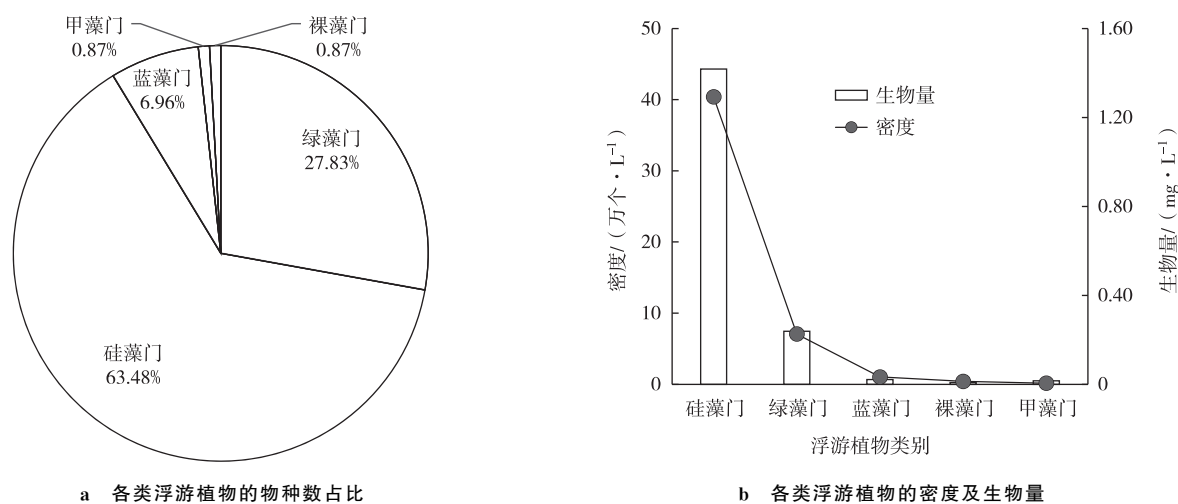


图 2 朝涪段各类浮游植物的物种数占比、密度及生物量

Fig. 2 The quantity proportion of species, density and biomass of phytoplankton in the Chaotianmen to Fuling Section of the Yangtze River

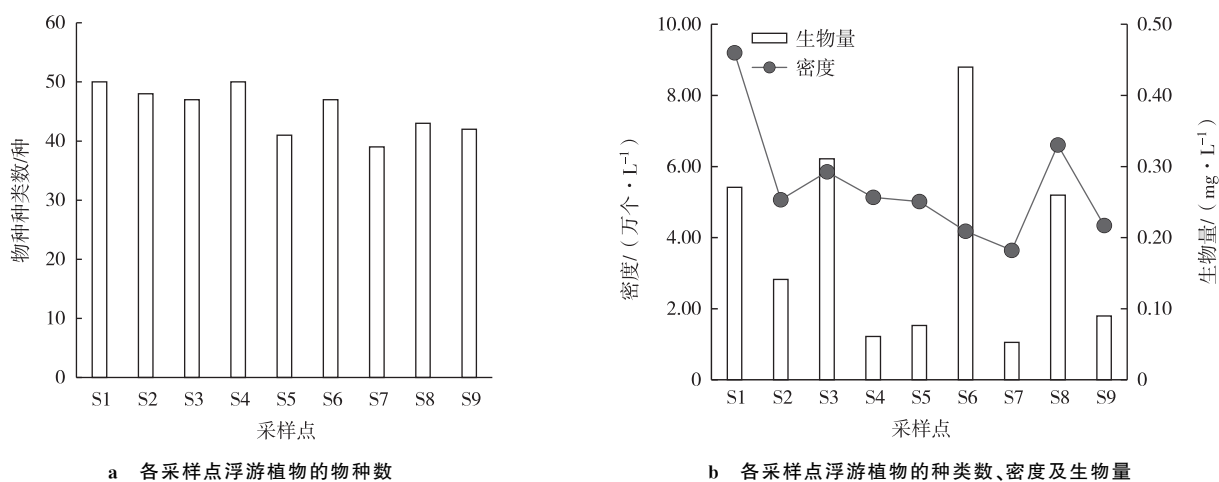


图 3 各采样点浮游植物的物种数、密度及生物量

Fig. 3 The quantity of species, density, and biomass of phytoplankton at each sampling point

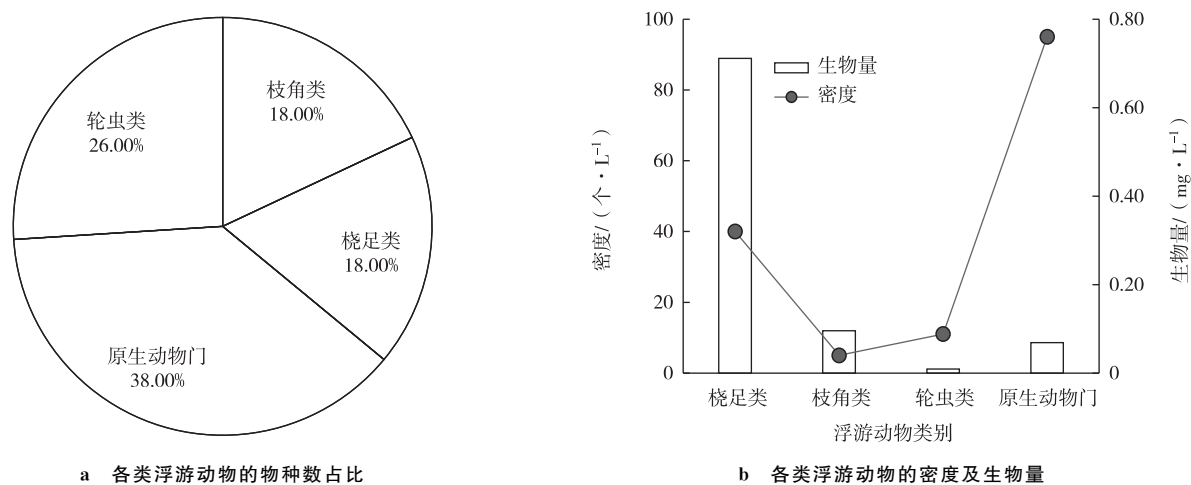


图 4 朝涪段各类浮游动物的物种数占比、密度及生物量

Fig. 4 The quantity proportion of species, density, and biomass of zooplankton in the Chaotianmen to Fuling Section of the Yangtze River

在朝涪段 9 个采样点中,浮游动物物种数最多和最少的采样点分别为 S4(27 种)和 S8(13 种)(图 5a)。图 5b 显示,不同采样点浮游动物的密度及生物量差异也较大,其中:S3 采样点浮游动物的密度及生物量最大,分别为 $24 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.1867 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;S7 采样点浮游动物的密度及生物量最小,分别为 $9 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.0176 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。总的来看,朝涪段 9 个采样点浮游动物的平均密度及平均生物量分别为 $16.8 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.0983 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

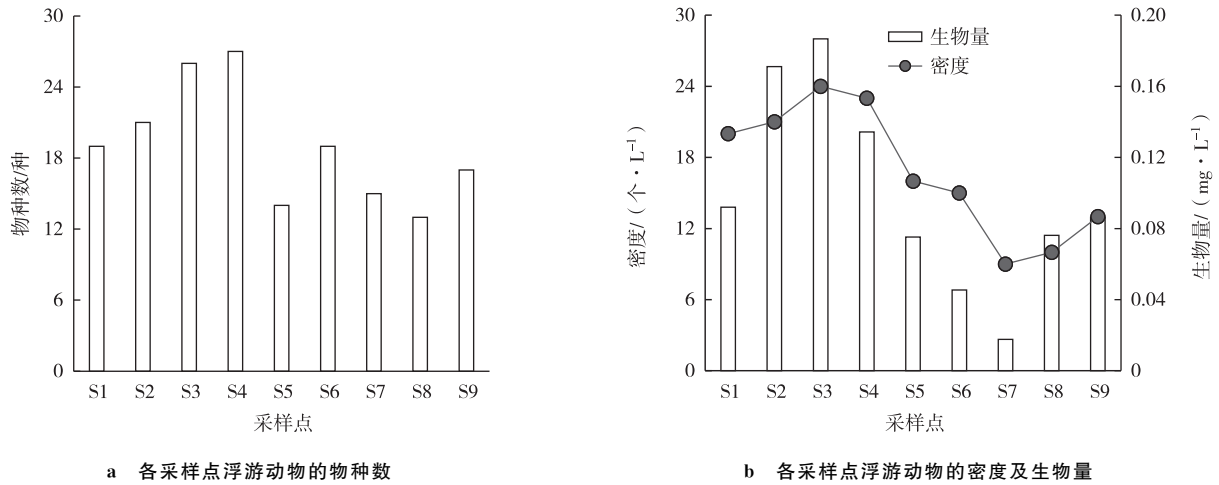


图 5 各采样点浮游动物的物种数、密度及生物量

Fig. 5 The quantity of species, density, and biomass of zooplankton at each sampling point

2.3 浮游生物的多样性

研究结果显示:朝涪段各采样点浮游植物多样性指数 H' 、 D 和 J 的数值范围分别为 $3.0779 \sim 3.4738$ 、 $6.5223 \sim 9.1944$ 和 $0.9422 \sim 0.9853$,3 个指数的平均值分别为 3.2754 、 7.7482 和 0.9660 (图 6a);该江段各采样点浮游动物多样性指数 H' 、 D 和 J 的数值范围分别为 $2.0174 \sim 2.5903$ 、 $3.0043 \sim 4.7199$ 和 $0.8665 \sim 0.9549$,它们的平均值分别为 2.2815 、 3.7802 和 0.9053 (图 6b)。

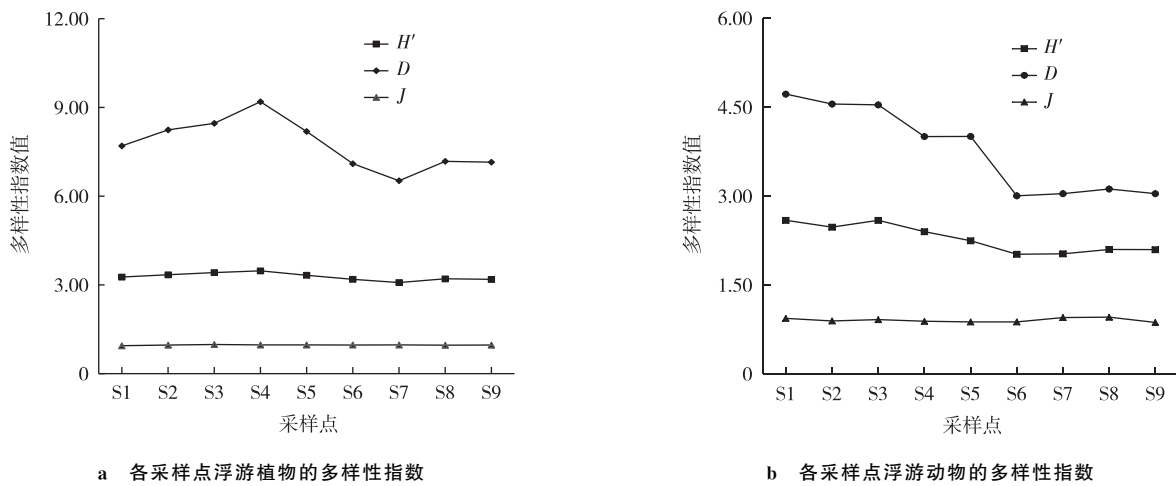


图 6 各采样点浮游生物多样性指数

Fig. 6 Index of plankton diversity at each sampling point

2.4 浮游生物优势种及水质评价

2.4.1 浮游生物优势种

以优势度指数大于 0.02 为标准,共确认朝涪段浮游生物优势种有 19 种,其中浮游植物 10 种、浮游动物 9 种(表 4)。浮游植物优势种中硅藻门物种数占比达 90%。在浮游动物优势种中原生动物门物种有 5 种,桡足类物种有 3 种,轮虫类物种仅 1 种。

表 4 朝涪段浮游生物优势度及优势种

Tab. 4 Dominance and dominant species of plankton in the Chaotianmen to Fuling Section of the Yangtze River

优势度	优势种	优势度	优势种
0.131 3	针棘匣壳虫(<i>Centropyxis aculeata</i>)	0.027 5	瓶砂壳虫(<i>Diffugia urceolata</i>)
0.062 6	球形砂壳虫(<i>Diffugia globulosa</i>)	0.026 9	变异直链藻(<i>Melosira varians</i>)
0.052 0	岛直链藻(<i>Melosira islandica</i>)	0.025 2	宽头基齿哲水蚤(<i>Clausocalanus laticeps</i>)
0.047 3	普通小球藻(<i>Chlorella vulgaris</i>)	0.023 6	剪形巨头轮虫(<i>Cephalodella forficula</i>)
0.045 2	肘状针杆藻(<i>Synedra ulna</i>)	0.022 4	无节幼体
0.043 8	普通表壳虫(<i>Arcella vulgaris</i>)	0.021 3	谷皮菱形藻(<i>Nitzschia palea</i>)
0.043 2	特异荡镖水蚤(<i>Neutrodiaptomus incongruens</i>)	0.020 7	膜糊沟链藻(<i>Aulacoseira ambigua</i>)
0.042 5	颗粒直链藻(<i>Melosira granulata</i>)	0.020 7	短小舟形藻(<i>Navicula exigua</i>)
0.028 9	具星小环藻(<i>Cyclotella stelligera</i>)	0.020 2	砂表壳虫(<i>Arcella arenaria</i>)
0.028 4	平滑明针杆藻(<i>Hyalosynedra laevigata</i>)		

注:无节幼体在本研究中被视为单独的一个物种。

2.4.2 基于浮游生物多样性的水质评价

根据图 6 可知:朝涪段各采样点浮游植物的 H' 值均大于 3, D 值均大于 4, J 值均大于 0.8; 结合表 1 中的评价标准可判定该江段的水质类型为轻污染。图 6 还显示:朝涪段各采样点浮游动物的 H' 值均大于 2, D 值均大于 3, J 值均大于 0.8; 参照表 1 的评价标准可判定该江段水质类型为 β -中污染。总体上看,基于浮游生物多样性指数进行水质评价的结果显示,朝涪段夏季水质类型为轻污染至 β -中污染。

结合图 3、图 5 可知:朝涪段各采样点浮游植物的密度均小于 30 万个 $\cdot \text{L}^{-1}$, 生物量均小于 1.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 浮游动物的密度均小于 1 000 个 $\cdot \text{L}^{-1}$, 生物量均小于 1.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。参照表 2 的评价标准,朝涪段夏季水体营养类型为贫营养型。

3 讨论与结论

水质状况直接关系到水生生物的健康。水质评价有多种方式,将非生物因素和生物因素结合起来对水质进行评价是当前水质评价工作中的重要手段。已有研究表明,浮游生物的种类、群落组成特征及多样性指数均可作为水质评价的重要指标^[20-22]。在本研究中,水质理化指标检测结果显示朝涪段水体为Ⅱ类水,水质良好,适宜鱼类以及其他水生生物生存。然而本研究使用浮游生物多样性指数对水质进行评价的结果显示,朝涪段水质类型为轻污染至 β -中污染,这与使用非生物因素进行水质评价的结果存在一定的差异。这种分别使用非生物因素和生物因素评价水质所得结果不完全相符的情况也出现在部分研究中^[23-24]。由于朝涪段部分区域紧邻人类居住地,受人为因素的干扰较大,因此该江段的浮游生物多样性会被影响;此时仅凭浮游生物多样性指数等生物指标对水质进行评价是不完全精准的^[25-26]。尽管使用浮游生物多样性指数对水质进行评价具有计算方法清晰、分级标准统一等优点,但也有研究表明,多样性指数单独用于评估水质具有一定的局限性^[27],主要包括:多样性指数的变化并不能够明确反映水质变好或变差^[28],多样性与环境胁迫类型及胁迫强度间不存在明确对应关系^[28],浮游生物游动会导致多样性指数改变进而影响评价结果^[29],多样性指数评价水质不适用于咸水和一些污染水体^[30-31]。因此在水质评价中,浮游生物多样性指数通常仅作为参考依据而非决定性依据。然而,由于纳入《地表水环境质量标准(GB 3838—2002)》^[19]中的理化因子相对有限,尤其是某些新型污染物未被发现或监测到,故单独依靠非生物因素也很难对水质进行全面评价^[30]。总之,在进行水质调查和评价工作时需综合考虑生物因素和非生物因素,才能从多个维度综合评价某地的水质状况。

浮游生物作为水体营养状态的评判指标具有巨大潜力^[32],例如:浮游植物中硅藻门物种一般大量分布于贫营养型水体中^[33],而水体中轮虫类的密度较大常与水体富营养化相关^[34]。本研究结果显示:朝涪段浮游植物的组成结构为硅藻-绿藻型,该组合型式主要出现在营养水平不高的水体中^[35],且硅藻门物种的生物量占绝对优势,同时轮虫类的密度较小。上述结果均反映出朝涪段水体的营养水平相对较低,而基于浮游生物的密度及生

物量对水体营养状态进行评价的结果则直接显示出该江段水体属于贫营养型水体。

本研究在朝涪段共检测到浮游植物 5 门 43 属 115 种,其中大多数为硅藻门物种,其次为绿藻门物种,该结果与在长江其他江段浮游生物的调查结果相似^[36-38]。本研究结果还显示,朝涪段不仅硅藻门物种数最多,物种的生物量和密度也较大,这符合中国境内大部分河流的浮游植物种类组成模式,即硅藻-绿藻型^[39]。硅藻门物种能够广泛生活在各种水环境中,而在水质较好、保持流水生境的水体中更是大量存在。朝涪段水质良好,营养化程度低,且在夏季因三峡大坝泄洪而使得该江段水体的流速较高,故而水体中浮游植物主要以硅藻门物种为主。此外,朝涪段各采样点浮游植物的物种数相差不大,生物量和密度最大的采样点分别为 S1 和 S6,而生物量及密度最小的采样点为 S7,推测其中原因应如下:S1 采样点水体流速相对较低,浮游植物容易聚集,因此该采样点浮游生物密度较大;S6 采样点的浮游植物种类中多为颗粒直链藻等体型较大的藻类,因此生物量相对较大;S7 采样点位于沟渠出口处,由于降雨原因,该采样点水体中悬浮物含量上升,水体透明度下降,浮游植物光合作用受阻,加之此处水流速度较高,因而不利于浮游生物的生存繁殖。

经检测,朝涪段的浮游动物共有 4 门(类)33 属 50 种,其中原生动物门的物种数最多,它的密度也最大,但它的生物量较小。浮游生物的生物量计算通常采用间接法,即在测量浮游生物个体的体积和物种个数基础上再用公式推算得出相应的生物量。对于体积微小的原生动物门物种而言,它的体积对生物量的贡献较小;而枝角类和桡足类浮游动物由于个体较大,因而它们的体积对生物量贡献也较大。本研究中原生动物和轮虫类物种的密度较大,有可能是因为鱼类更倾向于摄食水体中个体较大的浮游动物,因此这 2 类浮游动物被摄食的可能性得以降低^[40]。此外,朝涪段浮游动物的分布差异较大,其中:在 S8 采样点检出的浮游动物物种数最少,而在 S4 采样点检出的浮游动物物种数最多(尤其是轮虫类物种数较多),这可能跟这 2 个采样点的水体流速不同有关。研究表明,适宜的水体流速可以刺激浮游动物的生长,但流速过高会导致浮游动物难以聚集,且在较高的水体流速环境下轮虫类物种的种群生长较快^[41-42]。本研究中 S4 采样点相较于 S8 采样点而言,前者水体流速更高,而这可能是 S4 采样点轮虫类物种数较多的原因之一;但也是这一因素导致了 S4 样点的浮游动物不容易聚集,因而与 S8 采样点相比,S4 样点的浮游生物的生物量及密度均较小。

多样性指数 H' 、 D 和 J 常常用于反映群落的演替方向、速度和稳定程度。有文献根据 H' 值大小将多样性分为 I ~ V 级^[43-44],按照该分级标准,朝涪段各采样点浮游生物的多样性为 III ~ IV 级,即多样性为良好到丰富。此外, J 值越接近于 1 则说明物种分布越均匀。一般来讲,生物群落越稳定,它的多样性、丰富度和均匀程度就越高^[44]。由此可见,朝涪段夏季浮游生物群落较为稳定。

总之,本研究结果提示:朝涪段夏季水质总体良好,水体营养状态为贫营养状态,浮游生物群落组成较为稳定。本研究补充了朝涪段夏季浮游生物群落结构数据,为评估朝涪段航道整治工程对水环境和水生生物的影响提供了有效而充分的数据支撑。

参考文献:

- [1] 刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京:科学出版社,1999.
LIU J K. Advanced aquatic biology[M]. Beijing:Science Press,1999.
- [2] 曹慧敏,姚莉. 湖泊浮游生物群落多样性研究进展综述[J]. 广东化工,2020,47(9):127-128.
CAO H M, YAO L. Review on the research progress of plankton community diversity in lakes [J]. Guangdong Chemical Industry,2020,47(9):127-128.
- [3] MERZ E, KOZAKIEWICZ T, REYES M, et al. Underwater dual-magnification imaging for automated lake plankton monitoring [J]. Water Research,2021,203:117524.
- [4] 王晨,陶孟,李爱民,等. 基于环境 DNA 宏条形码技术的秦淮河生物多样性研究[J]. 生态学报,2022,42(2):611-624.
WANG C, TAO M, LI A M, et al. Research on the biodiversity of Qinhuai River based on environmental DNA metabarcoding [J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(2):611-624.
- [5] 张钰,练小龙,李英文,等. 重庆江津复兴河流域浮游生物群落结构、水质及鱼类资源现状[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),2021,38(4):36-47.
ZHANG Y, LIAN X L, LI Y W, et al. The current situation of plankton community structure, water quality, and fish resources of Fuxing River Basin Jiangjin, Chongqing [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science),2021,38(4):36-47.
- [6] 罗杨,程如丽,王梦,等. 普里河浮游生物群落结构、生物多样性及鱼类资源现状[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),2023,40

- (2):54-64.
- LUO Y, CHENG R L, WANG M, et al. Community structure and biodiversity of plankton and fish resources of the Puli River [J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2023, 40(2): 54-64.
- [7] 杨桐, 尹成杰, 过龙根, 等. 环保疏浚对洱海西沙坪湾底栖动物群落结构的影响[J]. *水生态学杂志*, 2022, 43(2): 77-85.
- YANG T, YIN C J, GUO L G, et al. Effects of dredging on zoobenthos community structure in West Shaping, Erhai Lake[J]. *Journal of Hydroecology*, 2022, 43(2): 77-85.
- [8] ADEKUNBI F O, ELEGBEDE I O, AKHIROMEN D I, et al. Impact of sand dredging activities on ecosystem and community survival in Ibeshe area of Lagos Lagoon, Nigeria[J]. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2018, 6(2): 112-125.
- [9] 李共国, 吴芝瑛, 虞左明. 引水和疏浚工程支配下杭州西湖浮游动物的群落变化[J]. *生态学报*, 2006, 26(10): 3508-3515.
- LI G G, WU Z Y, YU Z M. Changes in the structure of zooplankton community in Lake Xihu (West Lake) Hangzhou after water pumping and dredging treatments[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(10): 3508-3515.
- [10] 蒋玫, 沈新强, 杨红. 水下爆破对渔业生物影响的研究[J]. *海洋渔业*, 2005, 27(2): 150-153.
- JIANG M, SHEN X Q, YANG H. Influence of underwater explosions on fishery organisms[J]. *Marine Fisheries*, 2005, 27(2): 150-153.
- [11] ZHANG S Y, ZHOU Q H, XU D, et al. Effects of sediment dredging on water quality and zooplankton community structure in a shallow of eutrophic lake[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(2): 218-224.
- [12] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- ZHANG Z S, HUANG X F. Research methods of freshwater plankton[M]. Beijing: Science Press, 1991.
- [13] 陈大庆. 长江水生生物资源监测手册[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- CHEN D Q. Monitoring manual of aquatic biological resources in the Yangtze River[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2021.
- [14] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- HU H J, WEI Y X. The freshwater algae of China: systematics, taxonomy and ecology[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [15] 韩茂森, 束蕴芳. 中国淡水生物图谱[M]. 北京: 海洋出版社, 1995.
- HAN M S, SHU Y F. Atlas of freshwater organisms in China[M]. Beijing: China Ocean Press, 1995.
- [16] 邱阳凌, 林育青, 刘俊杰, 等. 淮河干流及主要支流夏季浮游植物群落生物多样性评价[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(4): 1665-1672.
- QIU Y L, LIN Y Q, LIU J J, et al. The biodiversity assessment of phytoplankton community in summer within main stream and tributary of Huaihe River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(4): 1665-1672.
- [17] 魏洪祥, 蒋湘辉, 张涛, 等. 水丰水库浮游植物群落特征及水质评价[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(2): 402-411.
- WEI H X, JIANG X H, ZHANG T, et al. Phytoplankton community characteristics and water quality evaluation in Shuifeng Reservoir[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(2): 402-411.
- [18] 鞠永富, 于洪贤, 于婷, 等. 西泉眼水库夏季浮游动物群落结构特征及水质评价[J]. *生态学报*, 2016, 36(16): 5126-5132.
- JU Y F, YU H X, YU T, et al. The zooplankton community structure and water quality of Xiquanyan Reservoir in summer[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(16): 5126-5132.
- [19] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002[S]. 北京: 中国环境出版集团, 2019.
- The State Environmental Protection Administration, The General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Environmental quality standards for surface water: GB 3838—2002[S]. Beijing: China Environment Publishing Group, 2019.
- [20] CASÉ M, LEÇA E E, LEITÃO S N, et al. Plankton community as an indicator of water quality in tropical shrimp culture ponds [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 56(7): 1343-1352.
- [21] POURAFRASYABI M, RAMEZANPOUR Z. Phytoplankton as bio-indicator of water quality in Sefid Rud River, Iran (South Caspian Sea)[J]. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 2014, 12(1): 31-40.
- [22] MANZOOR M, BHAT K A, KHURSHID N, et al. Bio-indicator species and their role in monitoring water pollution[M]// DAR G H, HAKEEM K R, MEHMOOD M A, et al. Freshwater pollution and aquatic ecosystems. New York: Apple Academic Press, 2021: 321-347.
- [23] 林小植, 胡苑玲, 王瑞旋, 等. 广东韩江潮州段浮游植物群落结构特征与水质评价[J]. *水生态学杂志*, 2023, 44(4): 52-60.
- LIN X Z, HU Y L, WANG R X, et al. Phytoplankton community structure and water quality assessment of the Chaozhou Section of Hanjiang River[J]. *Journal of Hydroecology*, 2023, 44(4): 52-60.

- [24] 陈光荣,钟萍,张修峰,等.惠州西湖浮游动物及其与水质的关系[J].湖泊科学,2008,20(3):351-356.
CHEN G R,ZHONG P,ZHANG X F,et al. Zooplankton and its relationship with water quality in Huizhou West Lake[J]. Journal of Lake Science,2008,20(3):351-356.
- [25] CONNELL J H. Diversity in tropical rain forests and coral reefs: high diversity of trees and corals is maintained only in a nonequilibrium state[J]. Science,1978,199(4335):1302-1310.
- [26] HUSTON M. A general hypothesis of species diversity[J]. The American Naturalist,1979,113(1):81-101.
- [27] ISMAEL A A,DORGHAM M M. Ecological indices as a tool for assessing pollution in El-Dekhaila Harbour (Alexandria, Egypt)[J]. Oceanologia,2003,45(1):121-131.
- [28] 秦娇娇,王艳.浮游植物多样性指数的应用及评价[J].沈阳师范大学学报(自然科学版),2014,32(4):502-505.
QIN J J,WANG Y. Application and evaluation of phytoplankton diversity indexes[J]. Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition),2014,32(4):502-505.
- [29] 曾阳,付秀娥,苗明升,等.基于大型浮游动物多样性与水质参数相关性分析的温榆河水质评价[J].生态毒理学报,2012,7(2):162-170.
ZENG Y,FU X E,MIAO M S,et al. Water quality assessment of Wenyuhe River based on cross-correlation analysis on the diversity of macro-zooplankton and water parameters[J]. Asian Journal of Ecotoxicology,2012,7(2):162-170.
- [30] NGUYEN G T,NHIEN H T H. Phytoplankton-water quality relationship in water bodies in the Mekong Delta, Vietnam[J]. Applied Environmental Research,2020,42(2):1-12.
- [31] ECHEVESTE P,DACHS J,BERROJALBIZ N,et al. Decrease in the abundance and viability of oceanic phytoplankton due to trace levels of complex mixtures of organic pollutants[J]. Chemosphere,2010,81(2):161-168.
- [32] THAKUR R K,JINDAL R,SINGH U B,et al. Plankton diversity and water quality assessment of three freshwater lakes of Mandi (Himachal Pradesh, India) with special reference to planktonic indicators[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013,185(10):8355-8373.
- [33] 陶敏,熊钰,李斌,等.嘉陵江四川段浮游植物群落时空分布及其环境影响因子[J].长江流域资源与环境,2021,30(7):1680-1694.
TAO M,XIONG Y,LI B,et al. Spatio-temporal distribution of phytoplankton and its environmental impact factors in Sichuan Section of Jialing River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2021,30(7):1680-1694.
- [34] JAKHAR P. Role of phytoplankton and zooplankton as health indicators of aquatic ecosystem: a review[J]. International Journal of Innovation Research Study,2013,2(12):489-500.
- [35] 林秋奇,胡韧,段舜山,等.广东省大中型供水水库营养现状及浮游生物的响应[J].生态学报,2003,23(6):1101-1108.
LIN Q Q,HU R,DUAN S S,et al. Reservoir trophic states and the response of plankton in Guangdong Province[J]. Acta Ecologica Sinica,2003,23(6):1101-1108.
- [36] 孙晓梅,刘绍平,段辛斌,等.长江中游江段浮游生物群落结构及其与环境因子的关系[J].淡水渔业,2021,51(3):3-12.
SUN X M,LIU S P,DUAN X B,et al. Plankton community structure and its relationship with environmental factors in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Freshwater Fisheries,2021,51(3):3-12.
- [37] 郭杰,王珂,段辛斌,等.长江荆江段浮游生物群落结构特征及其与环境因子的关系[J].长江流域资源与环境,2020,29(9):1954-1964.
GUO J,WANG K,DUAN X B,et al. Characteristics of plankton community and its relationship with environmental factors in the Jingjiang Reach of the Yangtze River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2020,29(9):1954-1964.
- [38] 刘明典,李鹏飞,曾泽国,等.长江干流安庆段浮游植物群落结构特征[J].淡水渔业,2017,47(4):29-36.
LIU M D,LI P F,ZENG Z G,et al. The characteristics of phytoplankton community structure in Anqing Section of the Yangtze River[J]. Freshwater Fisheries,2017,47(4):29-36.
- [39] 洪松,陈静生.中国河流水生生物群落结构特征探讨[J].水生生物学报,2002,26(3):295-305.
HONG S,CHEN J S. Structure characteristics of aquatic community from the main rivers in China[J]. Acta Hydrobiologica Sinica,2002,26(3):295-305.
- [40] 王晓清,曾亚英,吴含含,等.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,2013,37(3):488-494.
WANG X Q,ZENG Y Y,WU H H,et al. Investigation on plankton community composition and water quality state in the mainstream of Xiangjiang River[J]. Acta Hydrobiologica Sinica,2013,37(3):488-494.
- [41] SLUSS T D,COBBS G A,THORE J H. Impact of turbulence on riverine zooplankton: a mesocosm experiment[J]. Freshwater Biology,2008,53(10):1999-2010.

- [42] 朱宜平,张海平,李飞鹏,等. 水动力对浮游生物影响的围隔研究[J]. 环境科学,2010,31(1):69-75.
ZHU Y P,ZHANG H P,LI F P,et al. Enclosure experiments about the hydrodynamic effects on plankton[J]. Environmental Science,2010,31(1):69-75.
- [43] 孟顺龙,肖代,陈小丽,等. 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,2016,37(6):76-83.
MENG S L,XIAO D,CHEN X L,et al. Zooplankton community structure and water quality assessment in typical water bodies of the Lixia River Basin in dry and wet seasons[J]. Journal of Hydroecology,2016,37(6):76-83.
- [44] 陈家长,孟顺龙,尤洋,等. 太湖五里湖浮游植物群落结构特征分析[J]. 生态环境学报,2009,18(4):1358-1367.
CHEN J C,MENG S L,YOU Y,et al. Characteristic of phytoplankton community in Lake Wuli, Taihu[J]. Ecology and Environment Sciences,2009,18(4):1358-1367.

Ecology and Biodiversity Conservation in Three Gorges Area

Characteristics of Plankton Community Structure and Water Quality Evaluation in Summer of the Chaotianmen to Fuling Section of the Yangtze River

PENG Jianyu, HE Ruiqi, DUAN Yuchi, LI Yingwen, CHEN Qiliang

(Chongqing Key Laboratory of Animal Biology, College of Life Sciences,

Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: To investigate the characteristics of the plankton community structure and evaluate the water quality and trophic status of the Chaotianmen to Fuling Section of the Yangtze River in summer. Nine sampling points were set up in this section in May 2022 to collect samples, and the physical and chemical indicators of water quality and the species composition, density, biomass, diversity and dominant species of plankton were analyzed. The results showed that: 1) The water quality in the Chaotianmen to Fuling Section was good, and the physical and chemical indicators such as dissolved oxygen content, total phosphorus content, ammonia nitrogen content, and chemical oxygen demand met the Class II water standard. 2) A total of 115 species of phytoplankton belonging to 43 genera in 5 phyla were detected, dominated by Bacillariophyta and Chlorophyta. The average density and biomass of phytoplankton were $54\ 500$ individuals $\cdot L^{-1}$ and $0.189\ 2$ mg $\cdot L^{-1}$, respectively. A total of 50 species belonging to 33 genera and 4 categories of zooplankton were detected, among which Protozoa species accounted for the highest proportion, and the average density and biomass of zooplankton were 16.8 individuals $\cdot L^{-1}$ and $0.098\ 3$ mg $\cdot L^{-1}$, respectively. 3) The average values of Shannon-Wiener diversity index, Margalef richness index and Pielou evenness index of phytoplankton at all sampling sites were $3.275\ 4$, $7.748\ 2$, and $0.966\ 0$, respectively and the average values of these diversity indices for plankton were $2.281\ 5$, $3.780\ 2$, and $0.905\ 3$, respectively. 4) A total of 19 species of plankton species were detected as dominant species in the Chaotianmen to Fuling Section, including 10 plankton species and 9 zooplankton species. The results of the water quality evaluation based on the diversity index of plankton showed that the water quality type of the Chaotianmen to Fuling Section in summer was light pollution to beta-medium pollution. The above results indicate that the water quality in the Chaotianmen to Fuling Section is generally good, the nutrient status of the water body is anaerobic, and the composition of the plankton community is relatively stable.

Keywords: plankton; water quality; nutritional status; community characteristics; the Yangtze River

(责任编辑 方 兴)