

赤水河秋季浮游动物群落结构及其与环境因子关系

闵文武^{1,2,3}, 黄福江^{2,3}, 王伟^{2,3}

(1. 遵义师范学院, 赤水河流域环境保护与山地农业发展协同创新中心, 贵州遵义 563006; 2. 贵州省农业科学院水产研究所, 贵州贵阳 550025; 3. 贵州省特种水产工程技术中心, 贵州贵阳 550025)

摘要 [目的]研究赤水河流域浮游动物群落结构及其与环境因子的关系。[方法]于2018年9月对赤水河流域11个采样断面进行浮游动物采集和水环境因子测定。[结果]赤水河部分断面TN超标。赤水河共有浮游动物52种,轮虫种类最多(33种),原生动物11种,桡足类6种,枝角类最少(3种)。浮游动物优势种共7种,褐砂壳虫(*Diffugia avellana*)优势度指数最高,为0.204,枝角类不构成优势种。浮游动物密度、生物量、Margalef丰富度指数、Pielou's均匀度指数和Shannon Wiener多样性指数平均值分别为34.61个/L、27.11 μg/L、4.56、0.82和2.13。浮游动物群落结构空间差异显著。冗余分析结果显示,TN和SS是影响赤水河浮游动物群落结构的主要环境因子。[结论]该研究为赤水河流域健康管理提供数据补充。

关键词 浮游动物;群落结构;水环境因子;秋季;赤水河

中图分类号 Q958.8 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)11-0075-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.11.020



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Community Structure of Zooplankton in Chishui River in Autumn and Its Relationship with Environmental Factors

MIN Wen-wu^{1,2,3}, HUANG Fu-jiang^{2,3}, WANG Wei^{2,3} (1. Collaborative Innovation Center of Environmental Protection and Mountain Agriculture Development in Chishui River Basin, Zunyi Normal University, Zunyi, Guizhou 563006; 2. Guizhou Fisheries Research Institute, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang, Guizhou 550025; 3. Guizhou Special Aquatic Products Engineering Technology Center, Guiyang, Guizhou 550025)

Abstract [Objective] To study the community structure of zooplankton in Chishui River Basin and its relationship with environmental factors. [Method] In September 2018, the zooplankton collection and the determination of water environmental factors were carried out on 11 sampling sections of the Chishui River Basin. [Result] The concentration of TN exceeded the standard part of sections in Chishui River Basin. A total of 52 species of zooplankton were identified in the study area, most of them were rotiferas (33 species) having the highest abundance, of which 11 species as protozoa, 6 species as copepoda, and only 3 of them as cladocera. 7 dominant species were determined in Autumn, the most dominant species in protozoa was *Diffugia avellana* ($Y=0.204$), cladocera do not constitute a dominant species. The average values of zooplankton density, biomass, Margalef richness index, Pielou's evenness index and Shannon Wiener diversity index were 34.61 ind/L, 27.11 μg/L, 4.56, 0.82 and 2.13, respectively. There were significant spatial differences of zooplankton community structure in Chishui River Basin. The redundancy analysis showed that the most critical environmental factors affecting zooplankton community structure were total nitrogen and conductivity in autumn of Chishui River Basin. [Conclusion] The research provided data supplement for the health management of the Chishui River Basin.

Key words Zooplankton; Community structure; Water environmental factors; Autumn; Chishui River

赤水河是长江上游较为重要的一级支流,也是长江上游区域唯一没有筑坝且保持自然流态的支流,是长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区的重要组成部分,在长江上游珍稀特有鱼类等水生生物保护方面发挥至关重要的作用^[1],开展赤水河水生态健康与环境科学的研究具有重要意义。近年来,许多学者对赤水河流域的鱼类^[2-4]、底栖生物^[5-6]、细菌^[7-8]和浮游生物^[9]等开展了研究,为摸清赤水河流域鱼类资源与生态环境现状奠定了基础,也为保护和管理赤水河流域提供科学技术支持与数据支撑。

浮游动物广泛分布于各类水体中,是水生生物群落的重要组成部分^[10]。浮游动物在摄食浮游植物、腐殖质和细菌的同时自身又能被许多大型浮游动物或鱼类捕食,在生产者和次级消费者之间起到能量传递的作用^[11]。浮游动物个体小、生长周期短,对水环境因子的变化敏感,因此常作为水环境监测和评价的指标之一^[12-14]。笔者以赤水河为研究区域,于2018年9月进行水质监测和浮游动物采样,分析其浮游

动物群落结构及其与环境因子的关系,为赤水河流域健康管理提供数据补充。

1 材料与方法

1.1 采样断面设置 赤水河(104°45'~106°51'E、27°20'~28°50'N)发源于云南省镇雄县,流经云南、贵州、四川3省,于四川合江注入长江,干流总长436.5 km,流域面积20 440 km²,河流落差为1 588 km。根据赤水河流域特征,共设置11个调查断面,其中干流7个、支流4个,支流断面分别位于习水河(C4)、大同河(C2)、古蔺河(C6)和桐梓河(C8),采样断面分布如图1所示。

1.2 浮游动物样本采集 将25#浮游生物网口朝河水来向,将河水收集于网内进行过滤,过滤时间约1 min,浓缩的水样收集于100 mL标本瓶中,加入4%甲醛溶液固定,获得定性样本。用5 L采水器采集水样20 L,用25#浮游生物网过滤,将浓缩的水样收集于100 mL标本瓶中,加入4%甲醛溶液固定,获得定量样本。

1.3 水环境因子测定 水环境因子采取现场测定与实验室测定相结合,现场采集浮游动物样本的同时用多参数水质分析仪(Hachi Hq30d)测定水体溶解氧(DO)含量、pH、电导率和水温,用流速仪(Global water FP211)测定水流速。用水样瓶采集水样24 h内送回实验室,参照《地表水和污水监测技

基金项目 赤水河流域环境保护与山地农业发展协同创新中心开放基金项目(遵师协同[2018]03);贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2020]1Y102);贵州省农业科学院青年科技基金项目(2019-25)。

作者简介 闵文武(1987—),男,贵州施秉人,助理研究员,硕士,从事水域生态学研究。

收稿日期 2020-09-19

术规范》(国家环境保护总局,2003)测定总氮(TN)、总磷(TP)和悬浮物(SS)。

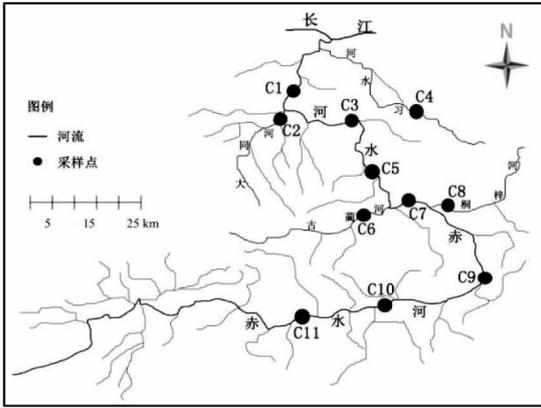


图1 赤水河采样断面分布

Fig. 1 Distribution of sampling sections of Chishui River

1.4 浮游动物物种鉴定和分类 将采集的定量和定性样本送回实验室,参考相关文献^[15-18]进行浮游动物种类的鉴定与计数,生物量为固定样本后称得的湿重($\mu\text{g/L}$)。

1.5 数据分析和处理 以每1 L水样出现的浮游动物个体数测定其密度(个/L),使用优势度指数(Y)确定优势种的种类,使用 Margalef 丰富度指数(d)、Pielou's 均匀度指数(J')和 Shannon Wiener 多样性指数(H')测定物种的多样性,并以此评价赤水河水质状况。运用主成分分析(principal components analysis,PCA)对赤水河环境起主导作用的环境因子进行研究,浮游动物多样性参数值运用物种的密度,选择 $Y > 0.001$ 的物种进行除趋势对应分析(detrended correspondence

analysis,DCA),若 DCA 结果中最大的梯度长度大于 4.0,则使用典范对应分析(canonical correspondence analysis,CCA)单峰模型分析物种与环境之间的关系,若小于 3.0 则使用冗余分析(redundancy analysis,RDA)线性模型分析,介于 3.0~4.0 则两者均可使用。

水环境数据(除 pH 外)和生物数据在分析前先进行 $\lg(x+1)$ 转换,使其趋于正态分布。PCA、DCA 和 RDA 均在 CANOCO4.5 上完成,物种多样性指数计算在 PRIMER5 上完成,优势度指数(Y)参考文献[19-20]在 Excel 2017 上计算完成,采样断面分布图在 Arc Map10.5 上完成。

2 结果与分析

2.1 赤水河流域水环境因子 赤水河各调查断面水体理化指标如表 1 所示,水温 $15.8 \sim 20.9$ $^{\circ}\text{C}$,平均值 17.6 $^{\circ}\text{C}$,变化趋势为从上游至下游逐步升高;pH $7.59 \sim 9.81$,平均值 8.35 ,显示赤水河水体呈弱碱性;流速 $0 \sim 0.353$ m/s ,平均值 0.120 m/s ,C8 断面位于桐梓河上的金阳电站水库内,因此未测出水流速;电导率 $112 \sim 556$ $\mu\text{s/cm}$,平均值 372 $\mu\text{s/cm}$;DO 为 $5.75 \sim 9.02$ mg/L ,平均值 8.25 mg/L ,低流速水体(C8)的 DO 含量显著低于高流速的水体(C6);TN 为 $1.30 \sim 4.96$ mg/L ,平均值 3.53 mg/L ,TP 为 $0.02 \sim 0.10$ mg/L ,平均值 0.05 mg/L ,TN 和 TP 在调查区域内未表现出规律性变化;SS 为 $7 \sim 15$ mg/L ,平均值 11 mg/L ,变化趋势为上游到下游逐渐增加。

Pearson 相关性分析结果显示,水温与 DO 呈极显著负相关($r = -0.917, P = 0.000$),pH 与 DO 呈显著负相关($r = -0.707, P = 0.015$),水体流速与电导率($r = 0.612, P = 0.045$)和 TP($r = 0.613, P = 0.045$)均呈显著正相关。

表 1 赤水河水体理化因子

Table 1 The physico-chemical parameters in Chishui River

断面编号 Section number	水温 Water temperature $^{\circ}\text{C}$	pH	流速 Velocity m/s	电导率 Conductivity $\mu\text{s/cm}$	DO mg/L	TN mg/L	TP mg/L	SS mg/L
C1	18.0	7.97	0.113	359	7.98	3.39	0.09	10
C2	17.7	7.59	0.063	112	8.22	1.30	0.03	11
C3	17.8	8.32	0.114	397	8.51	3.60	0.04	12
C4	17.7	8.28	0.023	260	8.76	1.89	0.03	15
C5	17.8	8.06	0.053	408	8.39	4.57	0.05	13
C6	16.9	8.24	0.353	556	9.02	3.06	0.10	13
C7	17.9	8.28	0.116	397	8.27	4.56	0.08	8
C8	20.9	9.81	0	415	5.75	2.93	0.02	9
C9	17.4	8.39	0.175	427	7.94	4.02	0.06	11
C10	16.1	8.47	0.159	385	8.85	4.57	0.03	7
C11	15.8	8.49	0.152	380	9.02	4.96	0.02	8
平均 Mean	17.6	8.35	0.120	372	8.25	3.53	0.05	11

2.2 浮游动物种类组成及群落结构特征 赤水河流域共检出浮游动物 52 种,以轮虫种类最多,为 33 种,占整个浮游动物群落的 63.46%,原生动物 11 种,占 21.15%,桡足类 5 种,占 9.62%,枝角类最少,3 种,占 5.77%。浮游动物优势种共 7 种(表 2),其中,原生动物 5 种,轮虫 1 种,桡足类 1 种。砂壳虫出现频率最高(100%),褐砂壳虫优势度指数最高($Y = 0.204$)。

调查断面浮游动物种类平均值为 14.82 种,其中 C4 断面最高,为 29 种,C5 断面最低,为 9 种;C5、C7、C10 和 C11 断面浮游动物种类数以原生动物最多,其余断面均以轮虫最多,枝角类种类最少(图 2a)。浮游动物密度平均值为 34.61 个/L,变化范围为 4.50~135.50 个/L,C4 断面密度最高,C3 断面最低,C3 和 C8 断面密度以轮虫最多,分别占 50% 和 60%,其余断面均以原生动物为主,占比为 64.21%~

94.64% (图 2b)。浮游动物生物量平均值为 27.11 $\mu\text{g/L}$, 变化范围为 4.81~90.61 $\mu\text{g/L}$, C4 和 C7 断面浮游动物生物量显著高于其他断面。C3、C4、C7、C9、C10 和 C11 均检出枝角类物种, 这些断面生物量组成均以枝角类为主 (图 2c)。

表 2 赤水河浮游动物优势种

Table 2 The dominant species of zooplankton in Chishui River

优势种名称 Dominant species name	出现频率 Occurrence frequency %	占总物种密度比例 Percentage of total species density/%	优势度指数 Dominance index (Y)
针棘匣壳虫 <i>Centropxyxis aculeate</i>	90.91	9.32	0.085
砂壳虫 <i>Diffugia</i> sp.	100	19.70	0.197
褐砂壳虫 <i>Diffugia awellana</i>	81.82	24.89	0.204
圆壳虫 <i>Cyclopyxis</i> sp.	90.91	9.46	0.086
弯凸表壳虫 <i>Arcella gibbosa</i>	81.82	4.27	0.035
水轮虫 <i>Epiphanes</i> sp.	63.64	3.81	0.024
无节幼体 <i>Copepod nauplius</i>	72.73	4.46	0.032

图 3 显示调查区域各断面浮游动物多样性参数值, d 为

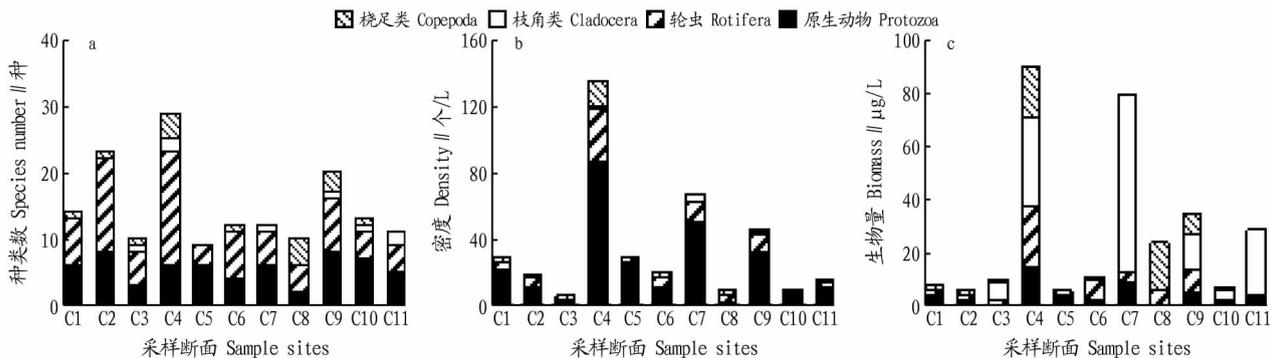


图 2 各调查断面浮游动物种类数 (a)、密度 (b) 和生物量 (c)

Fig. 2 The species number (a), density (b) and biomass (c) of zooplankton in each sample site

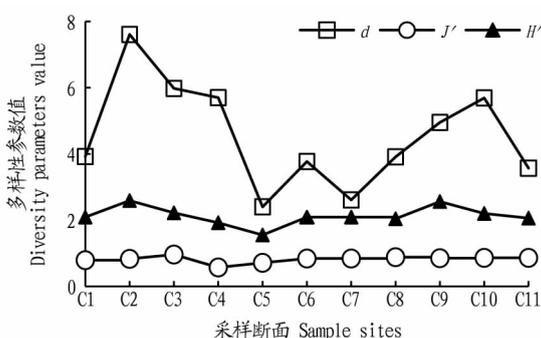


图 3 赤水河各断面浮游动物多样性参数值

Fig. 3 Parameters of zooplankton diversity in different sections of Chishui River

DCA 结果显示, 第 1 和第 2 轴特征值分别为 0.348 和 0.096, 4 轴的梯度长度分别为 2.199、1.478、1.011 和 0.845, 均小于 3, 所以使用 RDA 分析浮游动物群落与环境因子的关系 (图 5)。优势度指数 $Y > 0.001$ 的物种有 24 种, 其中枝角类 1 种、轮虫 13 种、原生动物 7 种、桡足类 3 种。经过 999 次蒙特卡洛置换检验表明 TN 和 SS 是显著影响赤水河浮游动物群落的主要因子。长额象鼻溞、表壳虫等物种的分布主要

2.40~7.61, 平均值 4.56, 最高点位于 C2, 最低点位于 C5; J' 为 0.57~0.96, 平均值 0.82, 最高点位于 C3, 最低点位于 C4; H' 为 1.55~2.59, 平均值 2.13, 最高点位于 C2, 最低点位于 C5。

2.3 浮游动物与环境因子相关性 Pearson 相关性分析赤水河水环境因子与浮游动物多样性指标参数的关系, 如表 3 所示, 各水环境因子与浮游动物多样性参数相关性较低, 浮游动物种类数与水体电导率 ($r = -0.632, P = 0.037$) 和 TN ($r = -0.689, P = 0.019$) 均呈显著负相关, d 与水体电导率 ($r = -0.614, P = 0.044$) 和 TN ($r = -0.645, P = 0.032$) 均呈显著负相关, 桡足类与 TN ($r = -0.604, P = 0.049$) 呈显著负相关, 其他指标之间相关性不显著。

对各环境因子进行主成分分析 (PCA), 如图 4 所示, 第 1 和第 2 轴特征值分别为 0.678 和 0.156, 分别解释了总环境变量的 67.8% 和 83.4%, 前 4 个主成分共解释了总环境变量变异的 98.4%。负载值越高表明环境变量与主成分的相关性越大, 通过比较分析, 选用对赤水河水环境起主要作用的电导率、SS 和 TN 与浮游动物群落进行对应分析。

受 TN 的影响, 其分布与 TN 呈正相关, 砂壳虫、腔轮虫等物种主要受 SS 的影响, 其分布与 SS 呈正相关, 赤水河秋季绝大多数浮游动物优势种分布与电导率呈负相关。

3 讨论与结论

3.1 赤水河流域水质现状分析 赤水河流域水温从上游至下游逐渐升高, 主要是由于赤水河处于云贵高原向四川盆地倾斜的斜坡面, 地势西南高而东北低, 流域气候地域差异较大, 上段三岔以上为暖温带高原气候, 气温稍低, 下游为四川盆地丘陵地带, 具有盆地亚热带湿润气候的特点, 河谷内气温较高, 流域气温的差异导致水温随之变化。

此次调查 TN 平均值为 3.53 mg/L, 根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 判定, TN 超出 V 类水质。吴湘香等^[21]分析了 2007—2010 年 6 月、9 月和 12 月赤水河流域水质状况, 结果显示, 水体 TN 平均值分别为 2.87、2.27 和 2.20 mg/L, 超出 V 类水质标准; 王军等^[22]结合 2016 年对赤水河的实际调查和 2007 年的历史数据分析得出, 赤水河 TN 春季平均值为 3.15 mg/L, 秋季平均值为 3.64 mg/L, 同样超出 V 类水质标准, 表明 TN 是影响赤水河流域水质标准的主要指标, 含氮营养盐是影响赤水河水水质健康的因子之一。

表3 浮游动物与环境因子相关性分析

Table 3 Correlation analysis of zooplankton and environmental factors

因素 Factor	水温 Water temperature	pH	流速 Velocity	电导率 Conductivity	DO	TN	TP	SS
种类数 Species number	-0.099	-0.382	-0.154	-0.632*	0.185	-0.689*	-0.105	0.353
密度 Density	0.000	-0.259	-0.150	-0.125	0.170	-0.174	0.272	0.335
生物量 Biomass	0.122	0.336	-0.170	0.148	-0.089	0.048	-0.061	-0.006
<i>d</i>	-0.101	-0.200	-0.087	-0.614*	0.090	-0.645*	-0.410	0.143
<i>J'</i>	-0.004	0.250	0.356	0.231	-0.207	0.338	0.024	-0.541
<i>H'</i>	-0.115	-0.149	0.247	-0.390	-0.030	-0.328	-0.029	-0.229
桡足类 Copepoda	0.326	0.200	-0.388	-0.260	-0.224	-0.604*	-0.270	0.495
枝角类 Cladocera	-0.234	0.013	-0.040	0.077	0.269	0.268	-0.014	-0.221
轮虫 Rotifera	0.258	0.049	-0.146	-0.158	-0.101	-0.460	0.148	0.354
原生动 Protozoa	-0.246	-0.483	-0.004	-0.132	0.408	-0.059	0.355	0.290

注: * 是在 0.05 水平(双侧)上显著相关

Note: * denotes significant correlation($P < 0.05$)

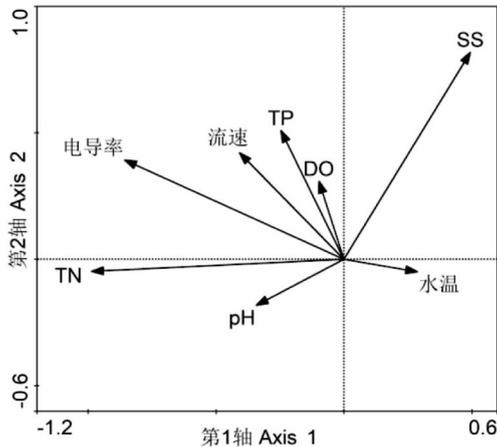
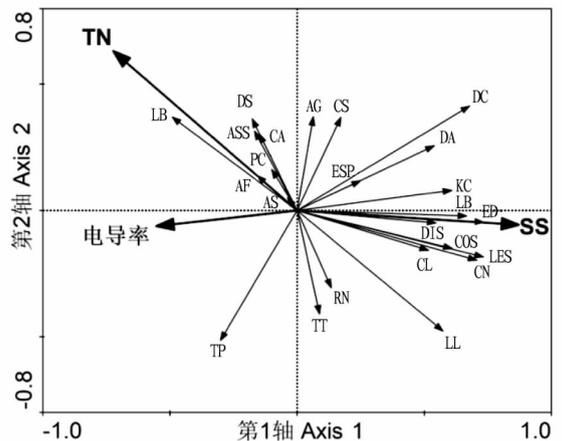


图4 赤水河流域水环境变量主成分分析

Fig. 4 Principal component analysis of water environment variables in Chishui River Basin

3.2 浮游动物群落及优势种 余海英^[23]于2007年6月和2008年1月对长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区浮游植物和浮游动物群落进行调查,结果显示,赤水河浮游动物共有75属111种,原生动物76种,轮虫28种,枝角类3种,桡足类4种,密度平均值为0.57个/L,变化范围为0.10~2.00个/L,生物量平均值为1.094 $\mu\text{g/L}$,变化范围为0.005~4.146 $\mu\text{g/L}$ 。此次调查结果显示浮游动物种类数(52种)低于余海英的研究结果,但密度和生物量均高于其研究结果,原因可能与调查频次差异和水环境变化有关,此外,原生动物是一类由单细胞组成的异养生物,某些种类介于植物和动物之间,易变形,能运动,此次采样对原生动物的样本保存未作特殊处理,因此在种类鉴定和计数过程中存在误差。浮游动物优势种和密度主要由原生物种组成,以砂壳虫属出现频率最高,因此表明原生动物是赤水河流域浮游动物的重要组成部分。

此次调查仅检出枝角类3种,分别为长额象鼻溞(*Bosmina longirostris*)、尖额溞(*Alona* sp.)和秀体溞(*Diaphanosoma* sp.),枝角类对浮游动物生物量贡献最大,在C7、C11和C4断面表现最为突出。研究表明,水温是影响枝角类群落演替最重要的环境因子,随着水温的变化,个体发育时间相应改变,从而改变群落组成和密度^[24]。赤水河C7、C11和C4



注: CN. 无节幼体 *Copepod nauplius*; CL. 剑水蚤幼体 *Cyclops larva*; TT. 台湾温剑水蚤 *Thermocyclops taihokuensis*; BL. 长额象鼻溞 *Bosmina longirostris*; KC. 螺形龟甲轮虫 *Keratella cochlearis*; AF. 裂痕龟纹轮虫 *Anuraeopsis fissa*; ESP. 水轮虫 *Epiphanes* sp.; ED. 大肚须足轮虫 *Euchlanns dilatata*; PC. 扁平泡轮虫 *Pompholyx complanata*; TP. 盘镜轮虫 *Testudinella patina*; LES. 腔轮虫 *Lecane* sp.; LB. 囊形腔轮虫 *Lecane bulla*; LL. 月形腔轮虫 *Lecane luna*; ASS. 无柄轮虫 *Ascomorpha* sp.; COS. 胶鞘轮虫 *Collothea* sp.; RN. 长足轮虫 *Rolaria neplunia*; DIS. 猪吻轮虫 *Dicranophorus* sp.; CA. 针棘匣壳虫 *Centropyxis aculeate*; DS. 砂壳虫 *Diffflugia* sp.; DC. 冠砂壳虫 *Diffflugia corona*; DA. 褐砂壳虫 *Diffflugia avellana*; CS. 圆壳虫 *Cyclopyxis* sp.; AS. 表壳虫 *Arcella* sp.; AG. 弯凸表壳虫 *Arcella gibbosa*

图5 赤水河流域环境因子与浮游动物群落 RDA 分析

Fig. 5 RDA analysis of environmental factors and zooplankton communities in the Chishui River Basin

断面水温较C1和C8断面低,C7和C11断面SS较低,均为8 mg/L,C4断面SS为15 mg/L,因此影响赤水河枝角类群落结构的环境因子还需进一步研究明确。

3.3 浮游动物与环境因子的关系 轮虫是淡水浮游动物的重要组成部分,其生长和繁殖易受水温、光照、pH等水环境因子的影响^[25-26]。赤水河浮游动物组成轮虫最多,以臂尾轮虫属(*Brachionus*)种类为主,这与近年来国内很多河流的浮游动物群落组成相似^[27-28]。C2和C4断面轮虫种类数最多,分别为14和17种,C2断面位于赤水河左岸支流大同河,C4

断面位于右岸支流习水河,2个断面电导率和TN均为调查区域内的最低。冷春梅等^[29]研究显示,轮虫密度、生物量均与包含了TN、TP、叶绿素a等环境因子的综合营养指数TLI(Σ)呈显著正相关,表明随着湖泊富营养化程度的加深,轮虫密度呈增长趋势,C2和C4断面TN分别为1.30和1.89 mg/L,分别属于IV类和V类水质,其他断面TN均明显高于该值,说明轮虫对TN的耐受值有限。有研究指出,总的物理和化学因素是影响轮虫结构的最重要因素(67.3%),其次是竞争^[30],表明轮虫种间生物竞争在一定程度上影响轮虫群落结构^[31]。

浮游动物群落结构时空分布受水温、浮游植物、营养盐的上行效应和鱼类捕食的下行效应以及种内竞争等因素的影响,在不同地区、不同水体、不同季节其主要影响因素略有不同^[32]。浮游动物群落与TN呈显著负相关,与代培等^[33]对长江安庆新洲水域的调查结构相同。N、P等营养元素通过调节浮游植物而间接影响浮游动物群落^[34],但过高的营养盐会导致藻类暴发,浮游动物不宜摄食蓝藻和绿藻,鱼类因藻类不适口或具有藻毒素而改食浮游动物^[35]。

赤水河因其水体含沙量高,SS浓度大且常呈赤红色而得名,此次调查显示,赤水河SS的空间差异表现为中下游高于上游,左岸支流高于右岸支流。研究表明,SS能够影响水生生物的生长、繁殖和摄食^[36],SS是显著影响赤水河浮游动物的环境因子,与砂壳虫等物种的相关性较为突出。研究显示,SS通常是通过改变水体的透明度而影响水生生物。赤水河水体透明度是影响银鮡等产漂流性卵鱼类繁殖活动的重要因子^[37]。Kirk等^[38]研究表明,当水体透明度低时,水蚤的种类会减少,水蚤生物量与透明度呈正相关。SS的存在可以改变浮游动物群落结构,当水中悬浮物含量低时,枝角类为优势种,当悬浮物含量升高时,轮虫为优势种^[39]。

参考文献

- [1] 刘飞,刘定明,袁大春,等.近十年来赤水河不同江段鱼类群落年际变化特征[J].水生生物学报,2020,44(1):122-132.
- [2] ZHANG F B,LIU F,QIN Q,et al. Diet composition and trophic guild structure of fish assemblage in headwaters of the Chishui River, a tributary of the upper Yangtze River, China[J]. Environmental biology of fishes, 2018, 101(8):1235-1248.
- [3] LIU F,CAO W,WANG J. Length-weight relationships of 77 fish species from the Chishui River, China[J]. Journal of applied ichthyology, 2014, 30(1):254-256.
- [4] WU J,WANG J,HE Y,et al. Fish assemblage structure in the Chishui River, a protected tributary of the Yangtze River[J]. Knowledge and management of aquatic ecosystems, 2011, 400:1-14.
- [5] WANG J,HU J C,TANG T,et al. Seasonal shifts in the assembly dynamics of benthic macroinvertebrate and diatom communities in a subtropical river[J]. Ecology & evolution, 2020, 10(2):692-704.
- [6] JIANG X M,XIONG J,XIE Z C,et al. Longitudinal patterns of macroinvertebrate functional feeding groups in a Chinese river system: A test for river continuum concept (RCC)[J]. Quaternary international, 2011, 244(2):289-295.
- [7] FENG Q Q,HAN L,TAN X,et al. Bacterial and archaeal diversities in Maotai section of the Chishui River, China[J]. Current microbiology, 2016, 73(6):924-929.
- [8] 李小霞,肖仲久,刘婷,等.贵州赤水河流域10个暗色丝孢菌省级新记录种[J].热带作物学报,2019,40(6):1153-1162.
- [9] WU X X,LI Y F,SHEN Z W,et al. The phytoplankton community structure and its relationship with the water environment in the Chishui River, a protected tributary of the Yangtze River[C]//Proceedings of the 35th IAHR world congress; VOLS I and II. Chengdu, China: Tsinghua University Press, 2013:2982-2990.
- [10] LEWIS W M JR. Zooplankton community analysis[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1979.
- [11] SUNITA K, SINGH J K. Studies on seasonal zooplankton community structure of Gandak river[J]. Research journal of science and technology, 2018, 10(2):137-139.
- [12] 李钥. 贵州红枫水库和百花水库后生浮游动物群落时空变化特征及对水环境的指示作用[D]. 贵阳:贵州师范大学, 2016:1-56.
- [13] 王硕,杨涛,李小平,等.渭河流域浮游动物群落结构及其水质评价[J].水生生物学报,2019,43(6):1333-1345.
- [14] 龚勋,封圆圆,赵海涛,等.倒天河水库和碧阳湖夏秋轮虫群落结构特征及水质评价[J].安徽农业科学,2019,47(12):104-107.
- [15] 沈温芬.原生动物学[M].北京:科学出版社,1999.
- [16] 王家楫.中国淡水轮虫志[M].北京:科学出版社,1961.
- [17] 蒋雯治,堵南山.中国动物志:淡水枝角类[M].北京:科学出版社,1979.
- [18] 周凤霞,陈剑虹.淡水微型生物与底栖动物图谱[M].2版.北京:化学工业出版社,2013.
- [19] 闵文武,向艳,王霞,等.乌江流域秋季浮游生物的群落结构及多样性[J].贵州农业科学,2019,47(7):70-74.
- [20] 方艳红,方红伦,王文君,等.岷江上游秋季浮游动物群落结构及水平分布特征[J].水生态学杂志,2018,39(6):30-36.
- [21] 吴湘香,李云峰,沈子伟,等.赤水河浮游植物群落结构特征及其与水环境因子的关系[J].中国水产科学,2014,21(2):361-368.
- [22] 王军,黄真理,李海英,等.基于大型无脊椎动物完整性的赤水河健康评价体系构建[J].中国环境监测,2018,34(6):62-72.
- [23] 余海英.长江上游珍稀、特有鱼类国家级自然保护区浮游植物和浮游动物种类分布和数量研究[D].重庆:西南大学,2008.
- [24] 祁峰,马燕武,李红,等.博斯腾湖枝角类群落结构特征及其影响因子[J].应用生态学报,2015,26(11):3516-3522.
- [25] 赵坤.淮河流域轮虫分布格局及其与环境因子相关性的研究[D].上海:上海师范大学,2014.
- [26] 邱小琼,赵红雪,孙晓雪.鸣翠湖轮虫群落特征及其与水环境因子的关系[J].宁夏大学学报(自然科学版),2012,33(1):62-68.
- [27] 罗丹,李星浩,余育和,等.长江中游干流浮游动物空间分布[J].水生生物学报,2019,43(S1):3-8.
- [28] 吴利,李源玲,陈延松.淮河干流浮游动物群落结构特征[J].湖泊科学,2015,27(5):932-940.
- [29] 冷春梅,李秀启,王亚楠,等.南四湖轮虫群落结构特征及其与水环境的关系[J].生物学杂志,2015,32(4):65-72.
- [30] HOFMANN W. The influence of abiotic environmental factors on population dynamics in planktonic rotifers[J]. Arch Hydrobiol Beih Ergebn Limnol, 1977, 8:77-83.
- [31] 殷旭旺,赵文,毕进红,等.卜氏囊膜轮虫对4种臂尾轮虫形态可塑性的影响[J].大连水产学院学报,2009,24(6):493-496.
- [32] LA H S,PARK K,WÄHLIN A,et al. Zooplankton and micronekton respond to climate fluctuations in the Amundsen Sea polynya, Antarctica[J]. Scientific reports, 2019, 9:1-7.
- [33] 代培,王银平,匡箴,等.长江安庆新洲水域浮游动物群落结构特征及其与环境因子的关系[J].安徽农业大学学报,2019,46(4):623-631.
- [34] 郭坤,彭婷,罗静波,等.长湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J].海洋与湖沼,2017,48(1):40-49.
- [35] NILSSEN J P. Tropical lakes-functional ecology and future development: The need for a process-orientated approach[J]. Hydrobiologia, 1984, 113(1):231-242.
- [36] 白雪梅,徐兆礼.底泥悬浮物对水生生物的影响[J].上海水产大学学报,2000,9(1):65-68.
- [37] 刘飞,张富斌,王雪,等.赤水河产漂流性卵鱼类的繁殖活动及其与环境因子之间的关系[J].水生生物学报,2019,43(S1):77-83.
- [38] KIRK K L,GILBERT J J. Suspended clay and the population dynamics of planktonic rotifers and cladocerans[J]. Ecology, 1990, 71(5):1741-1755.
- [39] HART R C. Population dynamics and production of five crustacean zooplankters in a subtropical reservoir during years of contrasting turbidity[J]. Freshwater biology, 1987, 18(2):287-318.