

三峡水库 175 m 蓄水后大宁河底栖动物群落结构季节动态

宋明江^{1,2} 邓华堂^{1,2} 朱峰跃¹ 刘绍平¹ 段辛斌¹ 陈大庆¹

(1. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 农业部长江中上游渔业资源环境科学观测站, 武汉 430223;
2. 西南大学动物科技学院/西南大学生命科学学院, 渔业资源环境研究中心, 重庆 400716)

SEASONAL DYNAMICS OF MACROINVERTEBRATES COMMUNITY STRUCTURE IN DANING RIVER AFTER A 175M DEPTH OF IMPOUNDMENT IN THE THREE GORGES RESERVOIR

SONG Ming-Jiang^{1,2}, DENG Hua-Tang^{1,2}, ZHU Feng-Yue¹, LIU Shao-Ping¹, DUAN Xin-Bin¹
and CHEN Da-Qing¹

(1. Scientific Observing and Experimental Station of Fishery Resources and Environment in the Upper and Middle Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture, Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China; 2. College of Animal and Technology/Research Center of Fishery Resource and Environment Key laboratory of Aquatic Science of Chongqing, College of Life Science, Southwest University, Chongqing 400716, China)

关键词: 大宁河; 大型底栖动物; 季节动态; 功能摄食类群; 典范对应分析

Key words: Daning River; Macroinvertebrates; Seasonal dynamics; Functional feeding groups; Canonical correspondence analysis (CCA)

中图分类号: Q145+.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2015)05-1046-08

底栖动物具有迁徙能力较弱和对环境变化敏感等特点,常作为水质监测指标^[1]。底栖动物摄食藻类等生物,又作为鱼类等的饵料,还兼有净化水质和监测物种入侵的作用,对水域生态系统能量流动和物质循环有着重要的作用^[2-4]。底栖动物的生长繁殖和种群变动与水深^[5-8]、溶解氧^[9,10]、温度^[11,12]、酸碱度^[13,14]、电导率和透明度^[15]等环境因子密切相关,环境因子通常随着季节变化而变化^[16]。因此,对底栖动物进行季节性采样并测定环境因子,对于研究底栖动物群落结构与环境因子变化的关系,探究和解释底栖动物群落结构动态规律非常必要。

近年来,国内底栖动物的研究多集中于湖泊^[17,18]和湿地^[19],河流底栖动物群落结构季节变动及其与环境因子间关系的研究相对较少^[20]。三峡水库蓄水后水文、水质等环境因子发生了显著改变^[21]。三峡水库 175 m 蓄水后,水位落差达 30 m,大宁河下游受到 40—60 km 回水影响,深度增加 65—70 m,河面增宽,河水流速小于

0.06 m/s,水文特征发生了剧烈变化^[22,23]。但是,有关大宁河底栖动物的生态学研究较少^[24],影响大宁河底栖动物的主要环境因子尚不明确,底栖群落季节性动态特征有待查明。本研究通过周年季度采样,试图阐明大宁河水系大型底栖动物群落结构的季节变化规律,找出影响底栖动物的主要因子,以期为大宁河渔业资源合理利用和生物多样性保护提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 研究区域和样点设置

大宁河是三峡水库左岸一级支流,发源于巫溪县高楼乡龙洞湾,在巫峡西口注入长江,长约 202 km,流域面积达 4415 km²,平均年降水量 1000 mm 以上,年均气温 19.8℃^[25]。三峡水库 175 m 蓄水后,大宁河下游流速大大变缓,河面增宽,水深增加,水位落差达增加;龙溪镇以上的河段水文特征没有显著变化^[22,23]。根据大宁河的水

收稿日期: 2015-01-27; 修订日期: 2015-05-17

基金项目: 中国长江三峡集团公司科研项目(No. 0799526; No. CT-12-08-01); 公益性行业(农业)科研专项经费(201303056-5)资助

作者简介: 宋明江(1988—),男,四川巴中人;硕士研究生;主要从事渔业资源与环境方面研究。E-mail: song.mingjiang163.com

通信作者: 陈大庆(1964—),男,研究员;E-mail: chdq@yfi.ac.cn

文特点, 从下游到上游设有巫山河口、双龙镇、大昌镇、龙溪镇、巫溪县、宁厂镇、下堡镇和徐家镇共 8 个采样站点(图 1)。

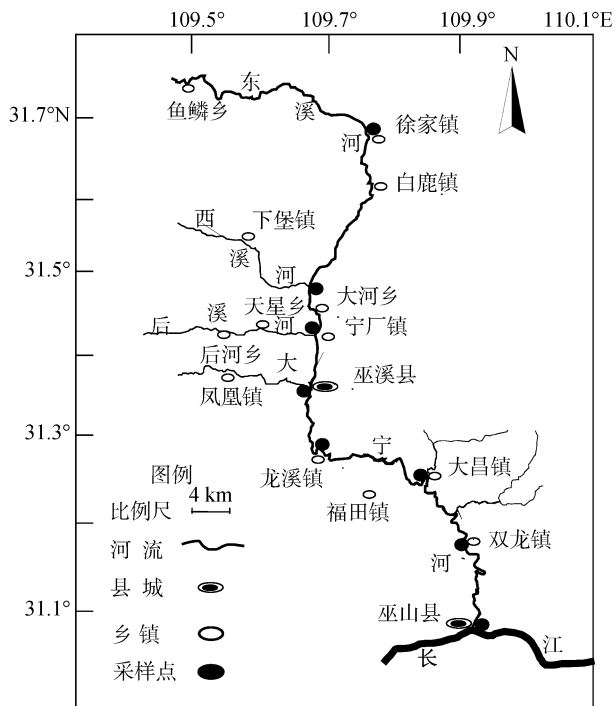


图 1 采样站点的分布

Fig. 1 Location of the sampling sites

1.2 底栖动物采样方法

于 2013 年 6、9、12 月和 2014 年 3 月, 在设定的站点进行底栖动物采样。使用彼得森采泥器(1/16 m² 样方)在下游静水区域采样, D 形手抄网和改良索伯网在上游流水区域采样。每个站点重复 2—3 次, 底泥混合后用 40 目网筛选、反复淘洗干净, 装入样品管内, 加入福尔马林液(10%)进行保存。参照经典分类方法^[26—29]鉴定底栖动物, 水生昆虫鉴定到科或属, 寡毛类鉴定到属或种, 软体动物鉴定到种。将各分类单元进行计数和称重(精度 0.001 g)后折算成密度和湿重生物量, 将相对丰度大于 5% 的种类定为优势种。

1.3 环境因子的测定

底栖动物采样过程中同步测定各采样点环境因子, 大宁河库湾(巫山河口、双龙镇和大昌镇)通过测量采泥器绳子长度测得水深(Dep), 上游水深用直尺直接测量。透明度(SD)采用黑白盘法测定。表层水温(T)、溶解氧(DO)、电导(Cond)、pH 用 YSI Pro2030 测定, 总固体悬浮物(TSS)通过 Hach DR2700 分光光度计测定。

1.4 数据处理

将大型底栖动物功能摄食类群(Functional feeding groups)分为滤食者(Filter-collectors)、集食者(Gather-collectors)、捕食者(Predators)、刮食者(Scrapers)和撕食者

(Shredders)5 个功能类群^[30], 分析各功能摄食类群的相对丰度和密度, 探究各季节底栖动物群落功能组成特征。

为阐明大型底栖动物与水温(T)、pH、水深(Dep)、总固体悬浮物(TSS)、电导(Cond)、溶解氧(DO)、透明度(SD)的关系, 采用典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA)对环境因子进行相关性分析。为了使结果更加直观, 具有代表性, 物种选取各季节的常见种和优势种进行分析, 对环境因子进行主成分分析(Principal Components Analysis, PCA), 将水环境因子数据进行相关性检验(KMO and Bartlett's Test), 将特征值大于 1 的作为主成分, 排除贡献率小的环境因子。

典范对应分析时, 先对物种和环境数据进行 lg(x+1) 转换, 再对物种数据进行去趋势对应分析(Detrended Correspondence Analysis, DCA)。若分析结果中轴梯度长度(Lengths of gradient)最大值大于 4.0, 则采用典范对应分析(CCA)进行物种-环境因子分析; 若结果小于 3.0, 则选择冗余分析(Redundancy Analysis, RDA); 若结果介于 3 到 4 之间则选择上述任何一种分析方法均可。

对不同季节的物种数目、密度、生物量等进行单因素方差分析(One-Way ANOVA), 方差分析和主成分分析使用 SPSS 21.0 软件, 典范对应分析用 CANOCO 4.5 软件进行。底栖动物多样性指数计算使用 Past 3.0, 其公式如下:

$$\text{Shannon-Wiener 指数 } H' = -\sum_{i=1}^S p_i \ln p_i \quad (1)$$

$$\text{Margalef 指数 } d_M = (S-1)/\ln N \quad (2)$$

$$\text{Pielou 指数 } J = H'/\ln N \quad (3)$$

$$\text{种类优势度 } Y = \frac{n_i}{N} f_i \quad (4)$$

式中, S 为物种数目, P_i 为 i 种的个体在全部个体中的比例, N 为个体总数, f_i 为第 i 个种在各样方中出现频率, n_i 为群落中第 i 个种的个体数量。

2 结果

2.1 大型底栖动物物种组成

本研究共鉴定出大型底栖动物 85 种, 隶属 16 目 51 科 63 属, 水生昆虫占据绝对优势地位, 春、夏、秋、冬季水生昆虫占物种总数的百分比分别为 60.71%、69.44%、73.53% 和 65.52%(图 2)。大宁河水系物种数表现为夏季(36 种)>秋季(34)>冬季(29 种)>春季(28 种), 单因素方差分析结果表明, 大型底栖动物种数的季节差异不显著(P>0.05)。

依据优势种标准, 纹石蛾(*Hydropsychidae* sp.)、多距石蛾(*Polycentropodidae* sp.)、似动蜉(*Cinygmina* sp.)、仙女虫(*Naididae* sp.)、朝大蚊(*Antocha* sp.)、大脐扁卷螺(*Hippeutis umbilicalis*)为大宁河水系优势种, 相对丰度为 33.29%、11.91%、8.23%、7.14%、5.71% 和 5.33%。按照春夏秋冬四个季节分别进行优势种分析, 优势类群(表 1)

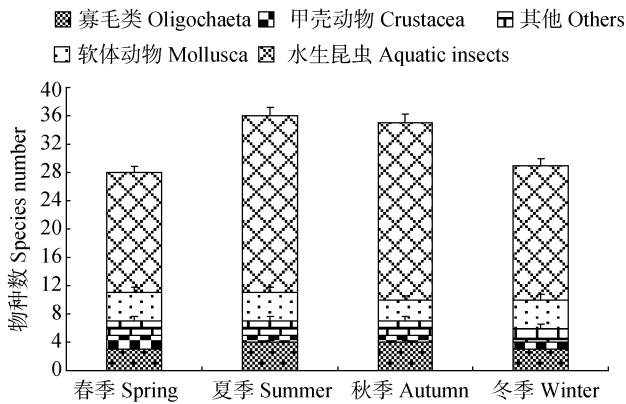


图 2 不同季节大宁河大型底栖动物物种组成
Fig. 2 Species richness of macro invertebrates about major groups in different seasons in Daning River

包含 12 个分类单元。扁蜉各个季节均成为优势类群, 各季节大宁河水系大型底栖动物优势类群和相对丰度差异较大(表 1)。

2.2 密度和生物量

大宁河大型底栖动物群落的年平均密度和生物量分别为(2.05±0.46) g/m²和(190.01±44.09) ind./m², 密度和生物量季节变化呈现出相似的趋势: 冬季、秋季大于春季、夏季。密度和生物量夏季最大, 秋季最小。单因素方差分析结果显示, 密度季节性差异显著(P<0.05), 生物量季节间差异显著(P<0.05)(表 2、表 3)。

2.3 多样性指数

大宁河底栖动物群落多样性指数的季节变化如图 3 所示, 香农威纳指数(Shannon-Wiener index)和马格列夫

表 1 大宁河水系各季节大型底栖动物优势类群相对丰度

Tab. 1 Relative abundance of macroinvertebrate dominant species in different seasons in Daning River (%)

优势种 Dominant species	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	6.51	0.18	0.18	3.70
苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>	1.08	8.66	0.01	0.69
管水蚓 <i>Aulodrilus sp.</i>	0.00	8.66	0.01	0.00
仙女虫 <i>Naididae sp.</i>	0.85	0.00	0.00	24.67
直突摇蚊 <i>Orthocladiinae sp.</i>	3.91	12.62	0.01	4.45
朝大蚊 <i>Antocha sp.</i>	0.28	0.90	2.18	14.86
扁蜉 <i>Heptageniidae sp.</i>	31.30	5.19	6.91	17.41
四节蜉 <i>Baetis sp.</i>	7.05	5.19	0.05	6.78
纹石蛾 <i>Hydropsychidae sp.</i>	2.32	2.95	45.78	18.74
多距石蛾 <i>Polycentropodidae sp.</i>	0.78	0.72	19.18	1.12
蜻 <i>Libellulidae sp.</i>	0.00	7.93	0.00	0.00
大脐扁卷螺 <i>Hippeutis umbilicalis</i>	27.12	12.62	5.06	1.36

表 2 不同季节大型底栖动物密度(ind./m²)

Tab. 2 Density of macroinvertebrate in different seasons in Daning River (Sum±SD)

季节 Seasons	寡毛类 Oligochaeta	甲壳动物 Crustacean	软体动物 Mollush	水生昆虫 Aquatic insects	其他 Others
春季 Spring	62.25±13.63	5.16±0.54	223.20±48.08	430.41±14.60	16.33±0.17
夏季 Summer	105.89±12.53	4.00±0.19	54.78±4.81	374.32±4.85	15.56±3.78
秋季 Autumn	104.20±19.80	1.02±0.14	375.05±119.60	4703.57±138.91	19.94±6.97
冬季 Winter	1005±160.74	8.01±1.76	129.67±10.80	2220.44±43.24	94.06±36.02

表 3 不同季节大型底栖动物生物量(g/m²)

Tab. 3 Biomass of macroinvertebrate in different seasons in Daning River (Sum±SD)

季节 Seasons	寡毛类 Oligochaeta	甲壳动物 Crustacean	软体动物 Mollush	水生昆虫 Aquatic insects	其他 Others
春季 Spring	0.24±0.04	0.52±0.16	1.79±0.87	2.54±0.03	0.16±0.03
夏季 Summer	4.30±0.73	2.53±0.69	6.09±0.27	5.02±0.12	0.41±0.08
秋季 Autumn	0.33±0.02	1.23±0.37	4.43±0.65	72.97±0.84	0.11±0.01
冬季 Winter	0.84±0.04	0.04±0.01	1.48±0.11	22.28±0.26	0.06±0.01

指数(Margalef index)季节变化趋势基本相同, 夏季最大, 春季和冬季次之, 秋季最小; 辛普森指数(Simpson index)各季节间无明显差异; 优势度指数(Dominane index)和均匀度指数(Pielou index)变化趋势相反, 优势度指数夏季最小, 秋季最大, 春季和冬季基本相当, 均匀度指数变化规律相反。这表明, 夏季底栖动物多样性程度最高, 均匀度程度较高, 优势种地位不突出; 春季和冬季底栖动物多群落样性程度大致相当, 均低于夏季, 但优势种地位较夏季突出, 秋季生物多样性程度最低, 优势种地位最为突出。

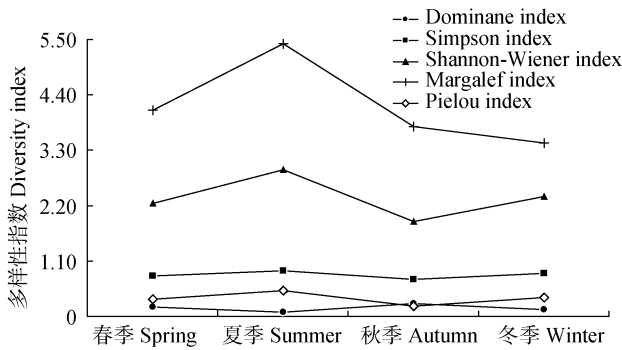


图 3 不同季节大宁河底栖动物生物多样性指数

Fig. 3 Biodiversity indices of macroinvertebrate in different seasons

2.4 大宁河水系大型底栖动物功能摄食类群

季节性底栖动物功能摄食类群相对丰度进行分析(图 4), 春季刮食者占绝对优势; 夏季刮食者、捕食者、集食者相对丰度较高, 滤食者、撕食者相对丰度较低; 秋季以滤食者占优势; 冬季摄食类群特征与夏季相似, 但各成分的比例更加均匀。

功能摄食类群密度的季节动态进行分析表明(图 5), 滤食者密度秋季显著高于其他季节, 季节间差异显著 ($P < 0.05$); 集食者密度冬季 > 秋季 > 夏季 > 春季, 冬季显著高于其他秋季 ($P < 0.05$); 捕食者密度在秋季最大, 冬季、夏季次之, 春季最小 ($P < 0.05$); 刮食者密度表现为秋季 > 冬季 > 春季 > 夏季 ($P < 0.05$); 撕食者密度在冬季最大, 秋季、春季次之, 夏季最小 ($P < 0.05$)。各功能摄食类群相对丰度和密度季节间差异显著 ($P < 0.05$)。

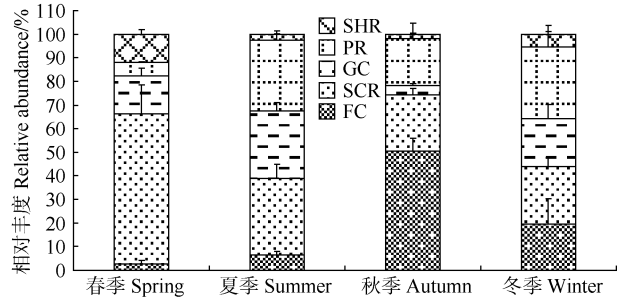


图 4 大型底栖动物功能摄食类群相对丰度的季节变化

Fig. 4 Relative abundance of functional feeding groups for macroinvertebrates in different seasons

SHR: 撕食者; SCR: 刮食者; PR: 捕食者; GC: 收集者; FC: 滤食者
SHR: Shredders; SCR: Scrapers; PR: Predators; GC: Gather-collectors; FC: Filter-collectors

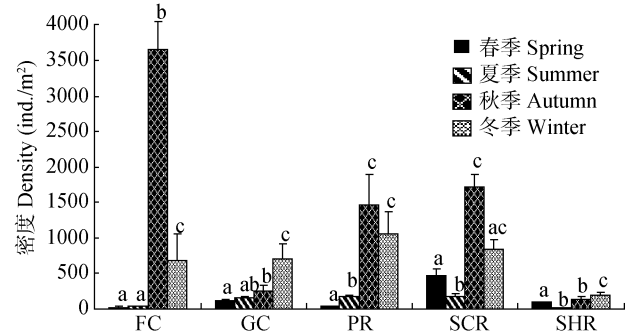


图 5 不同季节各功能摄食类群密度的比较

Fig. 5 Comparison of functional feeding groups density among different seasons

2.5 大宁河水系大型底栖动物与环境因子的定量关系

采样点水环境因子的季节变化情况(表 4), 大宁河溶解氧春季较高, 秋季最低; 酸碱度在 8.0 左右, 春季最大, 夏季最小, 电导率各季节差别较大。

环境因子相关性检验(KMO and Bartlett's Test)显示春季(KMO=0.250, $P < 0.001$)、夏季(KMO=0.389, $P < 0.001$)、秋季(KMO=0.381, $P < 0.001$)冬季(KMO=0.453, $P < 0.001$)均适合主成分分析。物种 DCA 分析显示, 各季节轴梯度长度(Lengths of gradient)最大值分别为 4.240、3.715、3.285 和 4.362, 均适合选用典范对应分析(CCA)进行分析。典范

表 4 大宁河主要环境因子
Tab. 4 Main environmental factors of Daning River

季节 Season	温度 Temperature (°C)	溶氧 Dissolved Oxygen (mg/L)	pH pH value	电导率 Conductivity (μs/cm)	水深 Depth (m)	透明度 Transparence (m)
春季 Spring	15.74±2.76	11.55±2.51	8.44±0.34	443.61±132.37	63.30±0.70	0.59±0.10
夏季 Summer	18.93±2.17	9.20±0.87	8.09±0.18	267.64±67.61	49.90±1.30	0.59±0.27
秋季 Autumn	17.94±2.95	6.29±0.66	8.60±0.27	305.58±142.62	56.40±0.90	0.62±0.27
冬季 Winter	13.61±2.49	9.24±1.26	7.99±0.16	282.80±100.32	68.10±2.40	0.62±0.22

注: 水深为下游平均水深, 上游水深在 0.10—0.30 m, 无可比性, 未列出

Note: Water depth showed the average water depth of the downstream, the upstream water depth was 0.1 to 0.3 m, there is no comparable, not listed

对应分析(CCA)分析结果(图 6)表明影响大宁河大型底栖动物群落结构的环境因子的数量和相关性季节间差异较大。春季影响底栖动物群落结构的主要环境因子是水深、透明度、电导率、酸碱度和温度;夏季影响底栖动物群落结构的主要环境因子包括水深、溶解氧、电导率和透明度;秋季和冬季影响底栖动物群落结构的环境因子是水深、溶解氧和透明度。

春季扁蜉、锯形蜉和四节蜉与透明度有较为密切相关性,颤蚓科物种与水深显示出显著的正相关,扁卷

螺、纹石蛾与电导率关系较为密切。夏季摇蚊、颤蚓科物种与电导率和水深表现出正相关,四节蜉与溶解氧呈现出正相关性,石蛾科和扁蜉与透明度相关性较大。秋季颤蚓科物种与水深显著相关,其他物种与透明度和溶解氧的关系不太密切。冬季颤蚓科与水深仍旧呈现出显著的正相关,四节蜉与溶解氧正相关性较为突出。整体来看,颤蚓科物种与水深和透明度显著相关,摇蚊和纹石蛾与电导率表现出正相关,蜉蛄目物种与透明度和溶解氧关系较为密切。

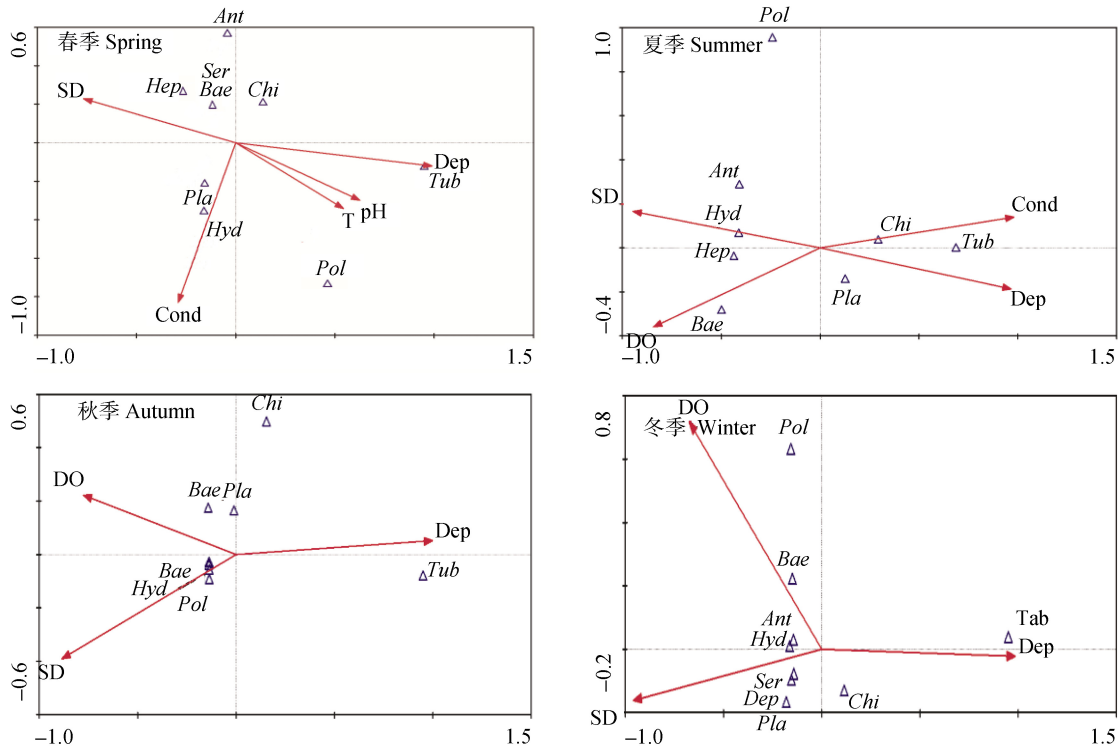


图 6 大型底栖动物优势种与环境变量的典范对应分析图

Fig. 6 CCA ordination diagrams of macroinvertebrates: dominant species-environmental variable

春季 Axes 1. 0.803, Axes 2. 0.392; 夏季 Axes 1. 0.649, Axes 2. 0.372; 秋季 Axes 1. 0.825, Axes 2. 0.468; 冬季 Axes 1. 0.865, Axes 2. 0.397. Tub. 颤蚓 Tubificidae sp.; Ant. 朝大蚊 Antocha sp.; Chi. 摇蚊 Chironomidae sp.; Ser. 锯形蜉 Serratella sp.; Bae. 四节蜉 Baetis sp.; Hyd. 纹石蛾 Hydropsychidae sp.; Pol. 多距石蛾 Polycentropodidae sp.; Pla. 大脐扁卷螺 Planorbidae sp.; Hep. 扁蜉 Heptageniidae sp.. SD. 透明度; DO. 溶解氧; Dep. 水深; Cond. 电导率; T. 水温; pH. 酸碱度

3 讨论

3.1 底栖动物群落季节动态

不同季节大宁河底栖动物优势种组成及其相对丰度差异较明显,优势类群决定底栖动物群落结构,这显示底栖动物群落结构存在较突出季节变化。底栖动物群落夏季多样性最高,春季和冬季次之,秋季最低,多样性指数反映出群落结构的多样性程度,由此可知大宁河底栖动物群落多样性也存在明显的季节性差异。功能摄食类群相对丰度和密度能够反映群落功能特征的稳定性^[20],大宁河大型底栖动物各功能摄食类群相对丰度和密度季节间差异显著,表明大宁河水系大型底栖动物群落功能结构

存在显著的季节性差异。综上所述,大宁河水系大型底栖动物群落结构和功能表现出较为突出的季节性差异,这种差异可能是该区域气候条件变化和底栖动物生活周期有关。以寡毛类为例,研究表明其繁殖时间在春末和秋末^[32],大宁河寡毛类密度和生物量变化规律是春季较低,夏季增加,秋季降低,冬季再增加,呈现周期性变化规律,这与该类底栖动物繁殖有关。大宁河属温带季风气候,四季温度变化明显,地处高山峡谷,太阳辐射时间较短,水体温度相对较低,而夏季较高的水温和溶解氧等条件,有利于寡毛类生长繁殖,寡毛类平均质量也较大,由此推断大宁河区域气候因素影响底栖动物群落季节性变化。

3.2 影响底栖动物的因素

比较研究发现, 大宁河底栖动物生物密度和生物量均较香溪河低^[20], 池仕运等^[24]的对大宁河等库区支流底栖动物的研究也发现同样的规律。进一步比较发现, 相同季节, 香溪河水温均高于大宁河, 环境温度对底栖动物的生长发育和繁殖有显著影响^[32, 33], 相对较低的水温可能是导致大宁河大型底栖动物现存量较低的原因之一。

从物种与环境因子的关系来看, 颤蚓科物种始终与水深表现为显著的正相关。这可能是因为水深的增加限制了其他底栖动物生存, 颤蚓科物种能适应低氧环境, 生活在水柱稳定性较高底层^[34]面临较小种间的竞争, 常常密度较大^[31], 发展成为深水区域的优势类群^[10]。与此同时, 我们还注意到颤蚓科物种还与透明度呈负相关。随着水深增加, 初级生产力和有机物产量显著降低, 大宁河库湾水深可达 70 m, 底层初级生产力几乎为零, 这就使得生活在底层的底栖动物对真光层沉降的有机物较为依赖。而透明度决定真光层的范围, 真光层生产的有机物在真光层和沉降的过程中不断分解, 透明度越大, 水深越大, 分解的作用持续的时间就越久, 有机物分解得就越多, 到达底层的有机物就越少^[35], 这对依赖于上层有机物的颤蚓科物种的生存就不利, 故颤蚓科物种与透明度呈现负相关性。

溪流底栖动物因受到夏季洪水的影响生物多样性常较低^[20], 而大宁河大型底栖动物夏季多样性和均匀度程度均较其他季节高。这可能是因为, 大宁河全年的降雨侵蚀力高峰集中于 7 月和 8 月上半月^[31], 本研究的夏季采样时间在 6 月, 此时尚未经历夏季洪峰的冲击, 底栖动物群落经过冬季和春季相对稳定的环境的发展, 故群落结构表现出较高的均匀性和多样性。同时, 研究还发现秋季底栖动物群落多样性程度全年最低, 优势种地位最为突出。这很可能是因为秋季(9 月)经历夏季洪水的影响刚刚结束, 底栖动物的群落结构受到严重干扰, 多样性和均匀度均低于夏季。优势种能很好的适应环境, 在受到干扰后能比其他物种更快恢复并迅速占据支配地位, 导致群落的均匀性降低, 优势种的地位突出, 故秋季优势种地位较夏季更为突出。由此可见, 夏季洪水对大宁河底栖动物群落有重要影响。

3.3 蓄水后大宁河底栖动物与鱼类群落变化

三峡水库 175 m 蓄水后, 库区水体理化因子发生了剧烈变化^[21], 大宁河鱼类和底栖动物优势种类和群落结构均发生了明显改变。鱼类个体趋向小型化, 主要渔获对象发生明显改变: 圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*) 和铜鱼(*Coreius heterodon*) 数量剧减; 鲇(*Silurus asotus*)、鲤(*Cyprinus carpio*) 及黄颡鱼(*Pseudobagrus fulvidraco*) 等渔获物比重上升, 河流生境改变对鱼类群落结构产生显著的影响^[36]。与此同时, 底栖动物种群和群落已出现明显静水-流水区域的空间分化, 群落结构和功能表现出较显

著的季节变化, 鱼类群落结构的变化与底栖动物群落结构是否有相关性还需要进一步研究。底栖动物作为鱼类的饵料生物, 底栖动物的种类、分布、密度和生物量的季节性变化规律可为鱼类增殖放流提供参考依据, 对构建和完善大宁河流域科学合理的渔业管理机制, 促进大宁河生态健康可持续发展具有一定参考价值。

致谢:

感谢华中农业大学谢意军和朱佳志在实验和数据处理方面给予的帮助和支持。

参考文献:

- [1] Duan X H, Wang Z Y, Yu G A. Ecological assessment of the Yangtze river eco-system with benthic invertebrate as indicator species [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(3): 241—247 [段学花, 王兆印, 余国安. 以底栖动物为指示物种对长江流域水生态进行评价. 长江流域资源与环境, 2009, 18(3): 241—247]
- [2] Vanni M J. Nutrient cycling by animals in freshwater ecosystems [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, 33(1): 341—370
- [3] Liu H P, Ye S W, Yang X F, et al. Spatio-temporal dynamics of aquatic organism community and their relationships to environment in Niyang River, Tibet: 3. Macrozoobenthos [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(1): 154—160 [刘海平, 叶少文, 杨雪峰, 等. 西藏尼洋河水生生物群落时空动态及与环境因子关系: 3. 大型底栖动物. 湖泊科学, 2014, 26(1): 154—160]
- [4] Xu X J. The ecology study of macrobenthos community in Dong tan of Chongming Island [D]. Thesis for Master of Science. East China Normal University, Shanghai. 2006 [徐晓军. 崇明东滩大型底栖动物群落生态学. 硕士学位论文. 华东师范大学, 上海, 2006]
- [5] Meng X L, He Y B, Song Z Y, et al. Structure and spatial distribution patterns of macrozoobenthos in Qinghai Lake area [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2014, 38(5): 819—827 [孟星亮, 何玉邦, 宋卓彦, 等. 青海湖区大型底栖动物群落结构与空间分布格局. 水生生物学报, 2014, 38(5): 819—827]
- [6] Malmquist H J, Antonsson T, Gudbergsson G, et al. Biodiversity of macroinvertebrates on rocky substrate in the surf zone of Icelandic lakes [J]. *Proceedings-international Association of Theoretical and Applied Limnology*, 2000, 27(1): 121—127
- [7] Liu J K. Advanced Hydrobiology [M]. Beijing: Science Press. 2002, 241—254 [刘建康. 高级水生生物学. 北京: 科学出版社. 2002, 241—254]
- [8] Pan H C. Studies on community structure and production of zoobenthos in Junshan Lake [D]. Thesis for Master of Science. Nanchang University, Nanchang, 2007 [潘洪超. 军山

- 湖底栖动物群落结构及其生产量的研究. 硕士学位论文. 南昌大学, 南昌. 2007]
- [9] Wang Y M, Li D J, Fang T, *et al.* Study on relation of distribution of benthos and hypoxia in Yangtze River estuary and adjacent sea [J]. *Marine Environmental Science*, 2008, **27**(2): 139—143, 164 [王延明, 李道季, 方涛, 等. 长江口及邻近海域底栖生物分布及与低氧区的关系研究. 海洋环境科学, 2008, **27**(2): 139—143, 164]
- [10] Shao M L, Han X Q, Xie Z C, *et al.* Comparative on macroinvertebrate communities along a cascade of reservoirs in Xiangxi River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(12): 4963—4971 [邵美玲, 韩新芹, 谢志才, 等. 香溪河流域梯级水库底栖动物群落比较. 生态学报, 2007, **27**(12): 4963—4971]
- [11] Tokeshi M. Production ecology. In: Armitage P D, Cranston P S, Pinder L C V. (eds.). *The Chironomidae: The biology and ecology of non-biting midges* [M]. Chapman Hall, London., 1995, 269—296
- [12] Duan X H, Wang Z Y, Xu M Z. Benthic macroinvertebrate and application in the assessment of stream ecology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010, 57 [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, 57]
- [13] Duan B, Li B F, Liu R S, *et al.* Diel rhythm of benthic macroinvertebrate's drift in streams in Hengshishui River watershed of Guangdong, China [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2008, **19**(5): 1084—1090 [段波, 李斌峰, 刘若思, 等. 广东横石水河流域溪流大型底栖动物漂流的昼夜节律. 应用生态学报, 2008, **19**(5): 1084—1090]
- [14] Lazerte B D, Dillon P J. Relative importance of anthropogenic versus natural source of acidity in lakes and streams of central Ontario. Canadian [J]. *Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 1984, **41**(11): 1664—1677
- [15] Peng S Y, Lai Z N, Jiang W X, *et al.* Study on community structure of macrozoobenthos and impact factors in Pearl River estuary [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010, **34**(6): 1179—1189 [彭松耀, 赖子尼, 蒋万祥, 高原, 等. 珠江口大型底栖动物的群落结构及影响因子研究. 水生生物学报, 2010, **34**(6): 1179—1189]
- [16] Li L. Macroinvertebrate community structure of spatial and temporal distribution characteristics and environment indication in Dongjiang [D]. Thesis for Master of Science. JiNan University, Guangzhou. 2013 [李良. 东江大型底栖动物群落结构时空分布特征与环境指示作用. 硕士学位论文, 暨南大学, 广州, 2013]
- [17] Wang Q, Wang H J, Cui Y D. Community characteristics of the macrozoobenthos and bioassessment of water quality in Lake Donghu district, Wuhan [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010, **34**(4): 739—746 [王琴, 王海军, 崔永德. 武汉东湖水网区底栖动物群落特征及其水质的生物学评价. 水生生物学报, 2010, **34**(4): 739—746]
- [18] Xie Z C, Cai Q H, Tang T, *et al.* Structure of macrozoobenthos of the East Dongting Nature Reserve, with emphasis on relationships with environmental variable [J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2003, **18**(3): 405—413
- [19] Lu Q, Chen H L, Shao X Y, *et al.* Ecological characteristics of macrobenthic communities and its relationships with environmental factors in Hangzhou Xixi Wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(9): 2803—2815 [陆强, 陈慧丽, 邵晓阳, 等. 杭州西溪湿地大型底栖动物群落特征及与环境因子的关系. 生态学报, 2013, **33**(9): 2803—2815]
- [20] Jiang W X, Jia X H, Zhou S C, *et al.* Seasonal dynamics of macrozoobenthos community structure in Xiangxi River [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, **20**(4): 923—928 [蒋万祥, 贾兴涣, 周淑婵, 等. 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]
- [21] Hu Z Y, Cai Q H. Preliminary report on aquatic ecosystem dynamics of the Three Gores Reservoir before and after impoundment [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, **30**(1): 1—6 [胡征宇, 蔡庆华. 三峡水库蓄水前后水生态系统动态的初步研究. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 1—6]
- [22] Wang D R. Eutrophication Investigation on the back water Reach of the Daning River after 135 m water storage of the Three Gorges Reservoir [D]. Thesis for Master of Science. Southwest University, Chongqing, 2005 [王德蕊. 三峡水库 135 m 蓄水后大宁河回水段水体富营养化研究. 硕士学位论文, 西南大学, 重庆. 2005]
- [23] Xu D X, Qin Y W, Zhang L, *et al.* Phosphorus forms and its distribution characteristics in sediments and soils of water-level fluctuating zone of the backwater reach from input river of Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(5): 1337—1344 [徐德星, 秦延文, 张雷, 等. 三峡入库河流大宁河回水区沉积物和消落带土壤磷形态及其分布特征研究. 环境科学, 2009, **30**(5): 1337—1344]
- [24] Chi S Y, Hu J X, Chen S, *et al.* Study on community structure of macroinvertebrates in Tributaries of Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Hydroecology*, 2011, **32**(4): 24—30 [池仕运, 胡菊香, 陈胜, 等. 三峡库区支流底栖动物群落结构研究. 水生态学杂志, 2011, **32**(4): 24—30]
- [25] Liu R M, Shen Z Y. Integrated assessment and changes of ecological environment in Daning River watershed [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2006, **42**(2): 200—203 [刘瑞民, 沈珍瑶. 大宁河流域生态环境综合评价及其演变. 北京师范大学学报(自然科学版), 2006, **42**(2): 200—203]
- [26] John C M, Yang L F, Tian L X. Aquatic insects of China useful for monitoring water quality. Nanjing: Hohai University Press, 1994, 11—413
- [27] Zhou C F. A Taxonomic study on Mayflies from Mainland China (Insecta: Ephemeroptera) [D]. Thesis for Master of Science. Nankai University, Tianjin, 2002 [周长发. 中国大陆蜉蝣目分类研究. 硕士毕业论文, 南开大学, 天津. 2002]
- [28] Wang H Z. Studies on taxonomy, distribution and ecology of microdrile *Oligochaetes* of China, with descriptions of two new species from the vicinity of the Great Wall station of China, Antarctica [M]. Beijing, Higher Education Press. 2002, 134—225 [王洪铸. 中国小蚓类研究—附中国南极长城站附

- 近地区两新种. 北京: 高等教育出版社. 2002, 134—225]
- [29] Liu Y Y. Sinica Economic Fauna, the Freshwater Mollusc [M]. Beijing, Science Press, 1979. 6—126 [刘月英, 张文珍, 王跃先, 等. 中国经济动物志淡水软体动物. 北京: 科学出版社, 1979. 6—126]
- [30] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, *et al.* Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: Periphyton, benthic macroinvertebrates and fish. 2nd Ed. EPA 841-B-99-002. [M]. Washington, D.C.:U. S. Environmental Protection Agency, Office of Water. 1999, 143
- [31] Hua L Z, Li X B, Yan C Z, *et al.* Temporal-spatial variations of rainfall erosivity in Daning River watershed of Three Gorges Reservoir region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, **28**(4): 22—25 [花利忠, 李秀斌, 颜昌宙, 等. 三峡库区大宁河流域降雨侵蚀力时空分布特征. 水土保持通报, 2008, **28**(4): 22—25]
- [32] Shao M L, Xie Z C, Ye L, *et al.* Monthly change of community structure of zoobenthos in Xiangxi Bay after impoundment of Three Gores Reservoir [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, **30**(1): 64—69 [邵美玲, 谢志才, 叶麟, 等. 三峡库区蓄水后香溪河库湾底栖动物群落结构的变化. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 64—69]
- [33] Rosenberg D M, Wiens A P, Sæther O A. Life histories of *Cricotopus (Cricotopus) bicinctus* and *C.(C.) mackenziensis (Diptera: Chironomidae)* in the Fort Simpson Area, Northwest Territories [J]. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 1977, **34**(2): 247—253
- [34] Li B, Shen H L, Zhang M, *et al.* Changes of macrobenthos community and their relationships with environmental factors along cascading reservoirs of Xiangxi River Basin, China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(8): 2070—2076 [李斌, 申恒伦, 张敏, 等. 香溪河流域梯级水库大型底栖动物群落变化及其与环境的关系. 生态学杂志, 2013, **32**(8): 2070—2076]
- [35] Gao X, Niu C J, Hu Z J. Macrobenthos community structure and its relations with environmental factors in Taihu River basin [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22**(12): 3329—3336. [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]
- [36] Yang F, Yao W Z, Deng H T, *et al.* The current situation of fish resources in the Daning River after the impoundment of the Three Gorges Reservoir [J]. *Freshwater Fisheries*, 2013, **43**(4): 51—57 [杨峰, 姚维志, 邓华堂, 等. 三峡库区蓄水后大宁河鱼类资源现状研究. 淡水渔业, 2013, **43**(4): 51—57]

《水生生物学报》编辑委员会

EDITORIAL BOARD OF ACTA HYDROBIOLOGICA SINICA

主 编 Chief Editor 桂建芳 GUI Jian-Fang

副主编 Associate Editor 解绶启 XIE Shou-Qi

委 员 Members (以姓氏拼音为序)

蔡庆华	CAI Qing-Hua	曹文宣	CAO Wen-Xuan	常剑波	CHANG Jian-Bo
陈家宽	CHEN Jia-Kuan	陈宜瑜	CHEN Yi-Yu	陈毅峰	CHEN Yi-Feng
高坤山	GAO Kun-Shan	何舜平	HE Shun-Ping	洪云汉	HONG Yun-Han
胡征宇	HU Zheng-Yu	李文鑫	LI Wen-Xin	李钟杰	LI Zhong-Jie
林浩然	LIN Hao-Ran	刘建康	LIU Jian-Kang	刘永定	LIU Yong-Ding
麦康森	MAI Kang-Sen	聂 品	NIE Pin	曲久辉	QU Jiu-Hui
宋立荣	SONG Li-Rong	唐启升	TANG Qi-Sheng	王 丁	WANG Ding
吴灶和	WU Zao-He	吴振斌	WU Zhen-Bin	相建海	XIANG Jian-Hai
肖 伟	XIAO Wei	谢 平	XIE Ping	谢小军	XIE Xiao-Jun
熊邦喜	XIONG Bang-Xi	熊思岳	XIONG Si-Yue	徐旭东	XU Xu-Dong
杨先乐	YANG Xian-Le	于 丹	YU Dan	余其兴	YU Qi-Xing
游 力	YOU Li	张奇亚	ZHANG Qi-Ya	朱作言	ZHU Zuo-Yan

Harald Rosenthal (德国)

编辑部 Editorial office 杜新征 DU Xin-Zheng 余 茜 YU Xi 叶文娟 YE Wen-Juan