

大型底栖动物摄食功能群研究

——以古里河国家湿地公园溪流为例

徐彬^{1,2}, 翟昊^{1,2}, 刘曼红^{1,2*}, 于洪贤^{1,2}, 曹晶晶²

¹东北林业大学湿地生物多样性保护研究中心, 黑龙江 哈尔滨

²东北林业大学野生动物与自然保护地学院, 黑龙江 哈尔滨

Email: 609210851@qq.com, manhong@nefu.edu.cn, china.yhx@163.com

收稿日期: 2021年3月20日; 录用日期: 2021年4月21日; 发布日期: 2021年4月28日

摘要

大型底栖动物是溪流生态系统的重要组成部分, 尤其是EPT (E: 蜉蝣目Ephemeroptera; P: 襉翅目Plecoptera; T: 毛翅目Trichoptera)水生昆虫幼虫, 既是溪流中鱼类的重要食物来源, 又可以指示水环境质量状况。本研究于2018年夏季(6月)和秋季(9月), 在黑龙江大兴安岭古里河国家湿地公园的溪流设置8个采样点, 进行大型底栖动物样本的采集以及水体理化参数的测定。分析大型底栖动物物种组成特征以及摄食功能群的季节变化, 运用冗余分析(Redundancy analysis, RDA)方法探讨大型底栖动物摄食功能群与环境因子的关系。本研究共采集到999个大型底栖动物个体, 鉴定出14目34科65种。通过对大型底栖动物摄食功能群的分析, 共发现有5种摄食功能群, 即直接集食者(GC)、捕食者(PR)、撕食者(SH)、刮食者(SC)和过滤收集者(FC), 其中捕食者和集食者为优势功能群。Pearson相关分析结果显示只有捕食者(PR)与氯离子(Cl⁻)存在显著的正相关($P < 0.05$, $P = 0.02$)。同时, RDA分析结果表明, 10种水体理化因子对大型底栖动物的分布共同起作用, 其中总磷和电导率、浊度、pH是影响大型底栖动物摄食功能群的主要环境因子。

关键词

大型底栖动物, 摄食功能群, 环境因子, 溪流, 古里河国家湿地公园

Study on Feeding Functional Groups of Macroinvertebrates

—A Case in the Streams of Gulihe National Wetland Park

Bin Xu^{1,2}, Hao Zhai^{1,2}, Manhong Liu^{1,2*}, Hongxian Yu^{1,2}, Jingjing Cao²

¹Wetland Biodiversity Conservation Research Center, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang

*通讯作者。

²College of Wildlife and Protected Areas, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang
Email: 609210851@qq.com, *manhong@nefu.edu.cn, china.yhx@163.com

Received: Mar. 20th, 2021; accepted: Apr. 21st, 2021; published: Apr. 28th, 2021

Abstract

Macroinvertebrates are important components of stream ecosystems, especially EPT (E: Ephemeroptera; P: Trichoptera; T: Plecoptera) aquatic insect larvae, which are important food sources for fish in streams. It can also indicate the quality of water environment. In the summer (June) and autumn (September) of 2018, 8 sampling sites were set up in the streams of Gulihe National Wetland Park, Greater Khingan, Heilongjiang, to collect macroinvertebrates samples and determine the physical and chemical parameters of water. The seasonal changes of feeding functional groups and species composition of macroinvertebrates were analyzed, and the relationship between feeding functional groups of macroinvertebrates and environmental factors was investigated by redundancy analysis (RDA). In this study, 999 individuals of macroinvertebrates were collected and 65 species belonging to 34 families and 14 orders were identified. Based on the analysis of feeding functional groups of macroinvertebrates, five feeding functional groups were found and namely, Shredders (SH), Gather-collectors (GC), Scrapers (SC), Predators (PR) and Filter-collectors (FC). The dominant functional group was the predators and the collectors. Pearson Correlation Analysis showed that only predators (PR) had significant positive correlation with Cl⁻ ($P < 0.05$, $P = 0.02$). At the same time, the results of RDA analysis showed that the 10 water physical and chemical factors used in this study had a common effect on the distribution of macroinvertebrates, among them, total phosphorus, conductivity, turbidity and pH are the main environmental factors that affect the feeding function group of macroinvertebrates.

Keywords

Macroinvertebrates, Feeding Functional Group, Environmental Factors, Stream, Gulihe National Wetland Park

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

溪流生态系统作为一种脆弱的生态系统, 目前受到广泛的关注[1]。古里河国家湿地公园是我国大兴安岭东部林区最具代表性的天然湿地生态系统。其湿地面积大、并且具有丰富的生物多样性。它由大古里河、小古里河、大金河与母子公河等众多溪流组成。公园内受到的干扰较少, 河溪众多, 物种丰富。其中, 细鳞鱼(*Brachymystax*)、哲罗鲑(*Hucho taimen*)和黑龙江鲟鱼(*Thymallus arcticus grubei*)等是重点保护鱼类。溪流中的这些鱼类主要以河溪中的水生昆虫为食, 尤其是 EPT (E: 蜉蝣目 Ephemeroptera; P: 襉翅目 Plecoptera; T: 毛翅目 Trichoptera)水生昆虫幼虫。EPT 水生昆虫是大型底栖动物的重要类群, 作为溪流中鱼类的重要食物来源、处于食物链中的重要环节。同时 EPT 水生昆虫也是溪流生态系统中喜急流和清洁水体的物种, 并具有对水环境变化非常敏感、易于采集等特点[2] [3]。当前, 我国东北地区在大型底栖动物方面的研究主要集中在挠力河湿地[4]、阿什河[5] [6]和帽儿山溪流[7]等水域, 大兴安岭溪流

是我国东北地区生物多样性比较完整的重要生态区之一。因此,进一步研究古里河国家湿地公园溪流大型底栖动物多样性,对大兴安岭区“生物多样性保护优先区域”具有非常重要的意义。

划分大型底栖动物的摄食功能是基于它们获取食物习性、形状和大小形态学和行为适应。其摄食功能群分布特征已经作为评估环境条件对水生生物影响的重要工具[8] [9] [10] [11] [12]。它不仅反映大型底栖动物的群落结构特征和生境适应性特性,还可以反映人类活动的干扰程度以及河流生态系统受损情况[12] [13]。在我国专门针对溪流大型底栖动物摄食类群研究并不多。除了东北地区在挠力河[4]、帽儿山溪流[7]、阿什河[5] [6]流域的研究外。在太子河流域的研究[14]表明:水体流量的不同会影响大型底栖动物群落分布的环境因子不同。除此之外,在济南河流 24 个采样点的研究[15]中发现:在淮河和黄河不同流域内影响大型底栖动物群落分布的环境因子不同。过往的研究进一步指示了大型底栖动物摄食功能群特性及其与环境因子的相关性研究,对古里河溪流生物多样性保护是非常必要的[16]。

2. 研究地概况

黑龙江古里河国家湿地公园位于大兴安岭加格达奇林业局的古里林场。地理坐标为东经 124°32'06"~124°47'26",北纬 50°36'19"~50°51'05"。属典型的寒温带大陆性季风气候区,全年温差较大,年平均气温-1.3℃~2℃,最低气温-45.4℃,年平均降水量约为 500 mm。河水于每年 11 月初开始结冰,直至翌年 4 月中下旬开始融化。

3. 材料与方法

3.1. 采样时间和采样点设置

本研究针对大兴安岭古里河国家湿地公园气候条件以及地理状况,于 2018 年夏季和秋季在公园内进行大型底栖动物样本和数据采集,并依据古里河流域水文条件及周围特点,选取了 8 个采样点,各样点利用 GPS 现场定位,样点依次为:1#为好风桥、2#为古里河中游、3#为古里河支流、4#为小古里河水质监测点 5 号、5#为小古里河水质监测点 4 号、6#为小古里河鱼类监测点 1 号、7#和 8#分别采自母子公河(图 1)。

3.2. 样本采集和鉴定

利用 D 形抄网(网口直径为 30 cm, 500 μm 网目)进行大型底栖动物采集。采集到的样本和沉积物在采集后将倒入 40 目分样筛中进行清洗。并由实验室相关研究人员用镊子将大型底栖动物样本挑拣出来,放入浓度为 85%的酒精溶液中进行固定保存,带回实验室后处理。

在实验室中,首先利用肉眼按目对大型底栖动物进行划分,再使用解剖镜和显微镜进行观察,将大多数样本鉴定到种,少数无法鉴别到种的可鉴定到科或属。鉴定方法根据大型底栖动物外部形态以及相关分类书籍进行鉴定如 Morse [17]、Merritt [18]以及周长发[19]等作者发表的论文。

3.3. 大型底栖动物摄食功能群划分

本研究根据食性将大型底栖动物摄食功能群划分为 5 种类型,捕食者(PR: 捕捉其他动物为食)、直接收集者(GC: 主要以河底多种有机颗粒为食)、过滤收集者(FC: 主要取食水流中的细有机颗粒,颗粒直径在 0.45 mm 到 1 mm 之间)、刮食者(SC: 主要取食营固着生活的生物)、撕食者(SH: 主要取食各种凋落物及粗有机颗粒,颗粒直径大于 1 mm)。

3.4. 水体理化指标测定

在现场利用 YSI-6600 多功能水质分析仪现场测量电导率(Cond)、浊度(NTU)、氯离子(Cl⁻)、水温(WT)、叶绿素(Chla)、硝酸盐(NO₃⁻)、氨氮(NH₄⁺)、pH 等水体理化因子。将每个采样点采集到的水样装入 500 ml

塑料容器中冷冻保存,回到实验室后,当天使用 HACH 公司生产的水质多参数分析系统 DR 系列(DRB200、DR1900)测量总磷(TP, mg/l)和总氮(TN, mg/l)等水体理化因子。

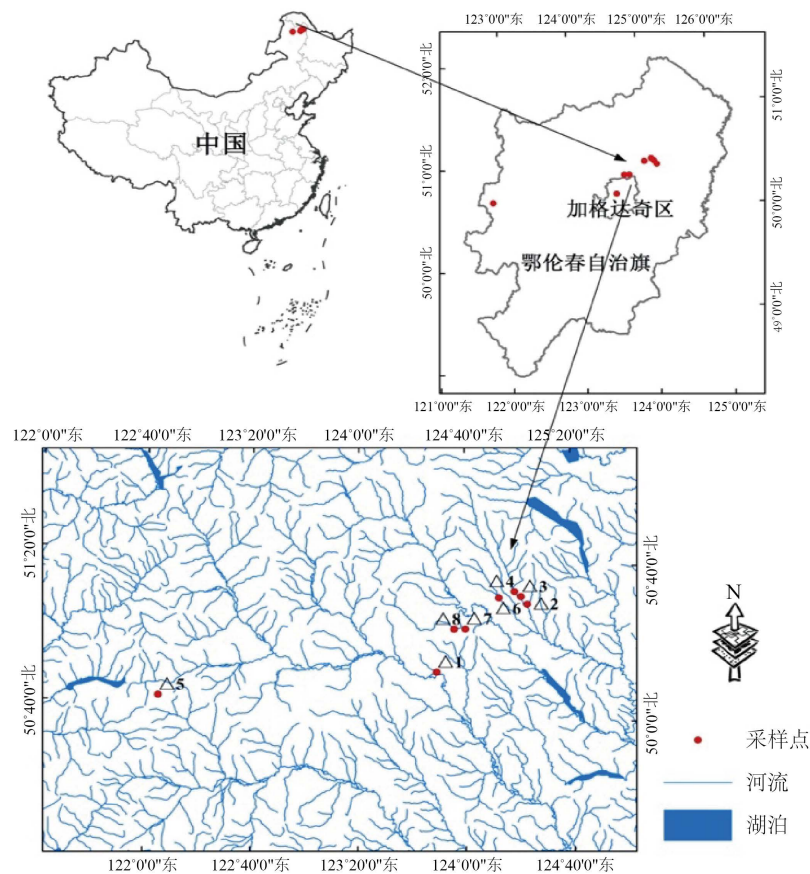


Figure 1. Map of sampling sites in Gulihe National Wetland Park
图 1. 古里河国家湿地公园采样点示意图

3.5. 统计分析方法

对于原始数据进行处理,创建各样点间底栖动物摄食功能群与其水体理化因子数据库。然后进行趋势对应分析(Detrended correspondence analysis, DCA)。在进行统计方法分析过程中由于该研究是在野外进行的采样,所以环境对于数据内源性以及外源性的因素对于数据的影响还是存在的。所以本研究在方法上进行进一步的选择。从得到的结果来看由于物种数据梯度最大值(Lengths of gradient)在四个轴都小于 3,因此选择适用的冗余分析(RDA),并使用 Canoco for windows 5.0 和 Canodraw 5.0 进行分析。

4. 结果与分析

4.1. 古里河国家湿地公园大型底栖动物物种组成特征

2018 年的调查期间,在古里河国家湿地公园共采集到大型底栖动物 999 个个体,经鉴定隶属于 14 目 34 科 65 种,包括 3 大类群:水生昆虫、环节动物和软体动物,其中水生昆虫种类最多,且在夏季和秋季 8 个采样点均有分布。共 51 种,占总物种数的 78.46%。其中 EPT 昆虫:蜉蝣目 9 种,襀翅目 5 种,毛翅目 8 种。其次发现 8 种软体动物和 6 种环节动物,分别占物种总数的 12.30%和 9.24% (表 1)。其中软体动物,主要有椎实螺科;环节动物主要有颤蚓科等。

Table 1. List and feeding functional group characteristics of macroinvertebrates in Gulihe National Wetland Park
表 1. 古里河国家湿地公园大型底栖动物名录和摄食功能群特征

目 Order	科/亚科 Family/subfamily	种 Species	摄食功能群 Feeding functional groups	
水生昆虫 Aquatic insects				
双翅目 Diptera	摇蚊亚科 Chironominae	前突摇蚊属一种 <i>Procladius</i> sp.	PR	
		绕圈摇蚊 <i>Chironomus circumdatus</i>	GC	
		墨黑摇蚊 <i>Chironomus anthracinus</i>	GC	
		背突摇蚊的一种 <i>Gyphomella</i> sp.	GC	
		秋月齿斑摇蚊 <i>Stictochironomus akizukii</i>	GC	
		淡绿二叉摇蚊 <i>Dicrotendipes pelochloris</i>	GC	
		敏隐摇蚊 <i>Cryptochironomus supplicans</i>	PR	
		角脊突摇蚊 <i>Cyphomella cornae</i>	GC	
		长足摇蚊亚科 Tanypodinae	古纳塔摇蚊 <i>Natarsia nugax</i>	PR
			异伪长足摇蚊 <i>Apsectrotanypus</i>	PR
	直突摇蚊亚科 Orthocladiinae	二叉步摇蚊属一种 <i>Brillibifida</i> sp.		SH
			浪突摇蚊属一种 <i>Zalutschia</i> sp.	GC
		纤细提况摇蚊 <i>Thienemannia gracilis</i>	GC	
		轮环足摇蚊 <i>Cricotopus annulator</i>	SH	
		直突摇蚊属一种 <i>Orthocladius</i> sp.	GC	
		大蚊科 Tipulidae	<i>Nippotipule</i> sp.	GC
			棘膝大蚊属一种 <i>Holorusia</i> sp.	SH
			细大蚊属一种 <i>Dicranomyia</i> sp.	SH
	大蚊属一种 <i>Tipule</i> sp.		SH	
	襀翅目 Plecoptera	网襀科 Perlodidae	<i>Perlodini</i> sp.	PR
<i>Isoperla</i> sp.			SH	
襀科 Perlidae		<i>Phanoperla</i> sp.	PR	
叉襀科 Nemouridae		倍叉襀属一种 <i>Nemoura</i> sp.	SH	
绿襀科 Chloroperlidae		<i>Suwallia</i> sp.	PR	
广翅目 Megaloptera	泥蛉科 Sialidae	古北泥蛉 <i>Sialis sibirica</i>	PR	
		泥蛉属一种 <i>Sialis</i> sp.	PR	
	齿蛉科 Corydalidae	星齿蛉属一种 <i>Protohermes</i> sp.	PR	
半翅目 Hemiptera	龟蝽科 Gerridae	大龟蝽属一种 <i>Aquarlus</i> sp.	PR	
蜻蜓目 Odonata	大蜻科 Macromiidae	<i>Macromia</i> sp.	PR	
		<i>Isogenus</i> sp.	PR	
	丝螳科 Lestidae	<i>Lestidae</i> sp.	SH	
	箭蜓科 Gomphidae	<i>Sinictinogophus</i>	PR	

Continued

毛翅目 Trichoptera	沼石蛾科 Limnephilidae	<i>Anabolia</i> sp.	SH
		<i>Dicosmoecus</i> sp.	SC
		<i>Clostoea</i> sp.	SH
		<i>Limnephilidae</i> sp.	SH
	短石蛾科 Brachycentridae	<i>Micrasema</i> sp.	SH
		<i>Brachycentrus</i> sp.	FC
		<i>Phryganeidae</i> sp.	SH
	石蛾科 Phryganeidae	<i>Apatania</i> sp.	SC
	蜉蝣目 Ephemeroptera	蜉蝣科 Ephemeridae	蜉蝣属一种 <i>Ghemera</i> sp.
扁蜉科 Heptageniidae		<i>Ecdyonurus</i> sp.	GC
细蜉科 Caenidae		细蜉属一种 <i>Caenis</i>	GC
		<i>Brachycera</i>	GC
小蜉科 Ephemerellidae		小蜉属一种 <i>Ephemerella</i> sp.	GC
		锯形蜉属一种 <i>Serratella</i> sp.	GC
短丝蜉科 Siphonuridae		短丝蜉属一种 <i>Siphonurus</i> sp.	GC
长附蜉科 Metretopodidae		长纹蜉属一种 <i>Metreplecton</i> sp.	PR
四节蜉科 Baetidae	四节蜉属一种 <i>Baetis</i> sp.	GC	
鞘翅目 Coleoptera	切眼龙虱亚科 Colymbetinae	<i>Agabus</i> sp.	PR
	沼梭科 Haliplidae	沼梭科一种 Haliplidae	PR
软体动物			
基眼目 Basommatophora	椎实螺科 Lymnaeidae	耳萝卜螺 <i>Radix auricularia</i>	SC
		椭圆萝卜螺 <i>Radix swinhoei</i>	SC
		卵萝卜螺 <i>Radix ovata</i>	SC
		鱼盘螺 <i>Valvata piscinalis</i>	SC
	扁蜷螺科 Planorbidae	凸旋螺 <i>Gyraulus convexiusculus</i>	SC
	中腹足目 Mesogastropoda	豆螺科 Bithyniidae	赤豆螺 <i>Bithynia fuchsiana</i>
真瓣鳃目 Eulamellibranchia	球蚬科 Sphaeriidae	湖球蚬属一种 <i>Sphaerium</i> sp.	FC
蚌目 Unionoida	蚌科 Unionidae	圆顶珠蚌 <i>Unio dougladiae</i>	FC
环节动物			
颤蚓目 Tubificida	颤蚓科 Tubificidae	<i>Tubificida</i> sp.	GC
		瑞士水丝蚓 <i>Limnodrilus helveticus</i>	GC
吻蛭目 Rhynchobdellida	舌蛭科 Glossiphoniidae	裸泽蛭 <i>Helobdella nuda</i>	PR
		静泽蛭 <i>Helobdella stagnalis</i>	PR
		拟扁蛭属一种 <i>Hemiclepsis</i> sp.	PR
		四目副蛭 <i>Parabdella quadrioculata</i>	PR

注: SH——撕食者, GC——集食者, SC——刮食者, PR——捕食者, FC——滤食者。

4.2. 大型底栖动物摄食功能群的季节变化

从摄食功能群种类组成来看, 在季节上有差异, 但差异不显著($P > 0.05$)。集食者种类数季节变化为夏季最多(15 种), 秋季次之(12 种), 集食者以蜉蝣目为主, 两个季节的优势物种有所差异, 夏季物种个数短丝蜉属一种(*Siphonurus* sp.), 秋季物种个数四节蜉属一种(*Baetis* sp.); 刮食者种类数季节变化为秋季最多(7 种), 夏季次之(6 种), 且主要以襀翅目为主, 两个季节物种数量最多的均为凸旋螺(*Gyraulus convexiusculus*); 捕食者种类数季节变化为秋季最多(15 种), 夏季次之(12 种), 主要以双翅目摇蚊科稚虫为主; 撕食者种类数季节变化为秋季最多(9 种), 夏季次之(5 种), 主要以毛翅目为主。两个季节物种数最多的均为 *Anabolia* sp.; 滤食者种类季节变化为秋季最多(3 种), 夏季次之(2 种)。主要以真瓣鳃目为主, 两个季节个数最多的均为湖球蚬属一种(*Sphaerium* sp.) (图 2)。

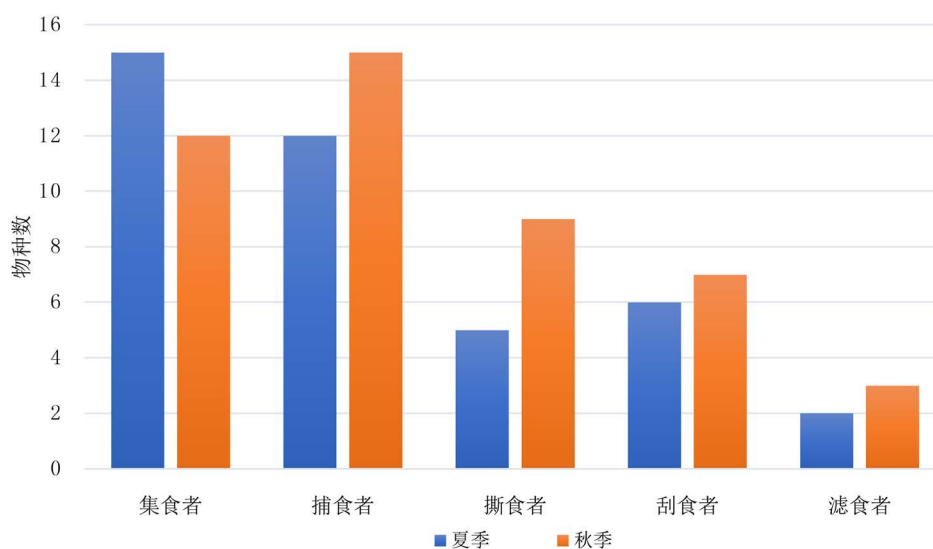


Figure 2. Quantitative characteristics of feeding functional groups of macroinvertebrates species in Gulihe National Wetland Park

图 2. 古里河国家湿地公园大型底栖动物摄食功能群物种数量特征

4.3. 水体理化因子的季节变化

研究发现, 溪流各采样点底质主要为砂底、砾石底、泥沙底和枯枝落叶凋零物等为主, 河岸带植被覆盖率高, 静水区以沉水植物为主。溪流的水体理化因子夏季和秋季存在一定差异。研究表明, 水体 pH 值在夏季呈中性, 秋季呈碱性, 这一结果与 Narangarvuu 等人的报道[20]相似。此外, 水温、电导率和总氮在夏季和秋季之间差异显著(配对样本 t 检验, $P < 0.05$); Cl^- 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、NTU、Chla 和 TP 差异不显著(配对样本 t 检验, $P > 0.05$) (见表 2)。

4.4. 水体理化因子与大型底栖动物摄食功能群的 Pearson 相关分析

古里河国家湿地公园 5 种大型底栖动物摄食功能群与水体理化因子的 Pearson 相关分析结果显示只有捕食者(PR)与氯离子(Cl^-)存在显著的正相关($P < 0.05$, $P = 0.026$), 而与其它水体理化因子没有明显的相关性(见表 3)。

4.5. 水体理化因子与大型底栖动物摄食功能群的 RDA 分析

在 RDA 分析中水环境因子选取了氯离子(Cl^-)、水温(WT)、pH、氨氮(NH_4^+)、硝酸根(NO_3^-)、总磷

(TP)、总氮(TN)、叶绿素(Chla)、浊度(NTU)和电导率(Cond)共 10 个指标, 分别与古里河国家湿地公园夏、秋两个季节以及 8 个采样点的大型底栖动物摄食功能群物种数量进行冗余分析(RDA)。

Table 2. Characterization of stream physical chemistry in all sampling sites (mean \pm standard deviation)

表 2. 所有采样点的溪流物理化学表征(平均值 \pm 标准偏差)

水参数 Water parameters	夏季 Summer	秋季 Autumn	<i>t</i> 检验 <i>t</i> test	P 值 <i>p</i> -value
氯离子 Cl ⁻ (mg/l)	70.41 \pm 26.89	47.67 \pm 12.93	2.1583	0.0677
氨氮 NH ₄ ⁺ (mg/l)	0.52 \pm 0.78	0.05 \pm 0.02	1.6836	0.1361
硝酸盐 NO ₃ ⁻ (mg/l)	0.05 \pm 0.07	0.02 \pm 0.01	1.5474	0.1657
浊度 NTU (mg/l)	3.60 \pm 1.12	3.04 \pm 1.23	0.7670	0.4682
叶绿素 Chla (mg/l)	3.68 \pm 2.58	3.77 \pm 1.84	-0.0797	0.9387
电导率 EC (μ S/cm)	50.5 \pm 26.05	67.38 \pm 22.12	-2.7710	0.0276*
pH	7.23 \pm 0.56	8.30 \pm 0.36	-4.1979	0.0040**
水温 WT ($^{\circ}$ C)	14.76 \pm 2.72	12.38 \pm 1.17	2.7656	0.0278*
总氮 TN (mg/l)	9.70 \pm 5.42	2.39 \pm 0.96	4.1460	0.0043**
总磷 TP (mg/l)	0.17 \pm 0.11	0.11 \pm 0.09	1.7083	0.1313

注: *表示有显著差异(P < 0.05); **表示有极显著性差异(P < 0.01)。

Table 3. Pearson correlation analysis of the number of feeding functional group species and water environmental factors

表 3. 摄食功能群物种数量与水环境因子的 Pearson 相关分析

统计分析 Statistical Analysis		GC	SC	PR	FC	SH
氯离子 Cl ⁻ (mg/l)	Pearson 相关性 显著性(双侧)	-0.109 0.688	-0.147 0.588	0.555* 0.026	0.087 0.748	0.168 0.533
氨氮 NH ₄ ⁺ (mg/l)	Pearson 相关性 显著性(双侧)	-0.215 0.424	-0.197 0.464	-0.243 0.365	-0.122 0.653	-0.207 0.441
硝酸盐 NO ₃ ⁻ (mg/l)	Pearson 相关性 显著性(双侧)	0.208 0.440	0.287 0.281	-0.147 0.586	-0.153 0.572	-0.035 0.897
浊度 NTU (mg/l)	Pearson 相关性 显著性(双侧)	-0.398 0.127	0.040 0.883	0.247 0.356	-0.379 0.148	-0.179 0.506
叶绿素 Chla (mg/l)	Pearson 相关性 显著性(双侧)	0.163 0.545	0.157 0.560	0.316 0.234	0.126 0.642	0.304 0.252
电导率 EC (μ S/cm)	Pearson 相关性 显著性(双侧)	0.190 0.480	0.282 0.290	0.007 0.979	-0.394 0.131	0.011 0.967
pH	Pearson 相关性 显著性(双侧)	-0.118 0.663	-0.018 0.949	0.361 0.170	-0.105 0.700	0.171 0.527
水温 WT ($^{\circ}$ C)	Pearson 相关性 显著性(双侧)	-0.165 0.543	0.041 0.879	-0.152 0.575	0.201 0.456	-0.255 0.341
总氮 TN (mg/l)	Pearson 相关性 显著性(双侧)	0.010 0.970	0.55 0.840	-0.126 0.641	-0.265 0.322	-0.173 0.523
总磷 TP (mg/l)	Pearson 相关性 显著性(双侧)	0.346 0.189	-0.169 0.532	-0.279 0.295	-0.491 0.053	0.285 0.285

注: *. 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

如图 3 所示, 夏、秋两季应用 RDA 分析得到前两个排序轴轴一(Axis 1)和轴二(Axis 2)的特征值为 0.3354 和 0.2100。大型底栖动物摄食功能群与环境因子相关性在 Axis 1 和 Axis 2 的值分别为 0.9852 和 0.9522, 排序结果是可信的。从图 3 中还可以看出摄食功能 FC 与理化因子 NH_4^+ 、WT 呈正相关, 与其他水体理化因子呈负相关。摄食功能群 GC 与理化因子 TP、 NO_3^- 、Chla、Cond 之间呈正相关。摄食功能群 SH 主要与 NO_3^- 、Chla、Cond、TN、 Cl^- 之间存在正相关关系。摄食功能群 SC 主要与 TN 之间存在正相关。摄食功能群 PR 主要与理化因子 pH、NTU、 Cl^- 之间存在正相关关系。 NH_4^+ 、WT 与摄食功能群 GC、SH、SC、PR 之间呈负相关(见图 3)。

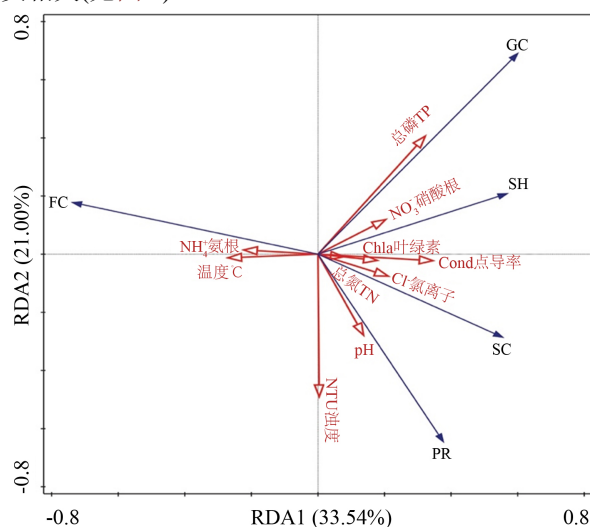


Figure 3. RDA sequence diagram between feeding functional groups and environmental factors of macroinvertebrates

图 3. 大型底栖动物摄食功能群与环境因子间的 RDA 排序图

5. 讨论

在本次调查期间, 共采集到大型底栖动物 14 目 34 科 65 种, 其中水生昆虫种类最多, 尤其是 EPT 类群。其稚虫大部分时间生活在水里, 它们的分布受周围各种环境条件影响较大, 因此它既在淡水生态系统的能量流动中起重要作用, 又是大型底栖动物中最具确定性的清洁指示物种[3] [21] [22]。在本研究中, 并且蜉蝣目(E)物种数量所占百分比在夏季(约 32.7%)高于秋季(20.4%)。大型底栖动物数量在夏季中期时减少, 而在夏季后期和秋季会由于羽化而引起数量的下降。而水温也是季节性差异的主要表现形式[23] [24] [25] [26]。以往的研究也支持这一发现: 河流系统中大型底栖动物群落组成季节性差异的重要影响因素, 通常被认为是水温导致[27], 并且根据“中度干扰”理论[28], 水温的季节性变化增加了物种的丰富度并保持了物种的最大密度。

以往的研究表明, 由于大型底栖动物大多以凋落物为食, 而凋落物的分解速率受水体 pH 影响, 所以 pH 的变化会影响大型底栖动物的取食并因此影响大型底栖动物物种的多样性变化[29] [30] [31] [32]。在本研究中, 通过对水体理化因子与大型底栖动物摄食功能群的 Pearson 相关分析可以得出, 捕食者(PR)与氯离子(Cl^-)存在显著的正相关关系($P < 0.05$, $P = 0.026$), 而其它水体理化因子没有明显的相关性。

RDA 分析结果表明, 总磷和电导率、pH 值、浊度对大型底栖动物摄食功能群的影响也比较大, 通过全年以及夏、秋两个季节的比较, 可以看出总磷始终与功能群 FC 存在负相关。在之前的相关研究表明, 总磷、总氮对大型底栖动物分布的影响通常呈负相关[33]。并且大型底栖动物群落结构退化随着总氮

和总磷的浓度增加往往愈加严重[34]。通常氮和磷是衡量水体富营养化的重要指示指标,其含量影响大型底栖动物分布[35]。但本次研究并未显示氮含量对于大型底栖动物功能群分布的影响。而 pH 值,以 EPT 为主的水生昆虫类群以及软体动物类对酸化水体比较敏感[36] [37]。根据 Stoertz 和 Bourne 等[38]的研究中得出蜉蝣目和蜻蜓目等类群随着 pH 值明显降低而消失,物种多样性显著降低[5]。本研究中水体均不呈现酸性,因此古里河国家湿地公园大型底栖动物多样性比较丰富。在 pH 值呈中性和碱性这两种水平下,反硝化过程表现良好并形成硝酸盐,浓度较高的硝酸盐为微生物创造了有利的环境,其通过提供更优质的食物来影响大型底栖动物的生产繁殖[39] [40]。所以本研究进一步观察到大型底栖动物群落变化与生活史特征有关,食物来源等可能导致大型底栖动物群落的季节性变化。

6. 结论

2018 年夏季和秋季,在黑龙江省古里河国家湿地公园共采集到 999 个大型底栖动物个体,鉴定出 14 目 34 科 65 种,分别属于 5 个摄食功能群,其中捕食者和集食者为优势功能群。通过分析 10 种水体理化因子对大型底栖动物分布的影响,结果表明,总磷、电导率、浊度和 pH 是影响大型底栖动物摄食功能群的主要环境因子,并且只有捕食者与氯离子存在显著的正相关关系。

基金项目

国家重点研发计划,典型脆弱生态修复与保护研究(2016YFC05004-3)。

参考文献

- [1] Strayer, D.L. and Dudgeon, D. (2010) Freshwater Biodiversity Conservation: Recent Progress and Future Challenges. *Journal of the North American Benthological Society*, **29**, 344-358. <https://doi.org/10.1899/08-171.1>
- [2] Poikane, S., Solimini, A., van de Bund, W., Zampoukas, N., Hering, D., et al. (2012) Three Hundred Ways to Assess Europe's Surface Waters: An Almost Complete Overview of Biological Methods to Implement the Water Framework Directive. *Ecological Indicators*, **18**, 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.10.009>
- [3] Wu, M.Y., Kuo, S.L. and Liu, W.C. (2012) Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedastic Model for Water Quality Analyses and Time Series Investigation in Reservoir Watersheds. *Environmental Engineering Science*, **29**, 227-237. <https://doi.org/10.1089/ees.2011.0086>
- [4] 刘曼红, 孟瑶, 曹晶晶, 崔兴波. 挠力河湿地大型底栖动物功能特性[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(1): 76-82.
- [5] 董雪, 蔡艳, 贾铭宇, 刘曼红. 阿什河春季不同河段大型底栖动物群落结构与环境因子的比较研究[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(1): 90-93.
- [6] 李亚俊, 吴梦婷, 张宇, 梁靖媚, 刘曼红. 利用水生昆虫对阿什河上游秋季水质的生物学评价[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(3): 135-139.
- [7] 刘曼红, 李亚俊, 张宇, 贾铭宇. 帽儿山溪流水生昆虫与环境因子的相关性研究[J]. 吉林农业大学学报, 2014, 36(4): 479-487.
- [8] van den Belt, M. and Blake, D. (2014) Ecosystem services in New Zealand Ago-Ecosystems: A Literature Review. *Ecosystem Services*, **9**, 115-132.
- [9] Chen, W., Moriya, K., Sakai, T. and Cao, C. (2016) Monitoring of Post-Fire Forest Recovery under Different Restoration Treatments Based on Time-Series ALOS/PALSAR Data. 2016 *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Beijing, 10-15 July 2016, 1749-1752. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7729448>
- [10] Tollner, E.W. and Douglas-Mankin, K.R. (2017) International Watershed Technology: Improving Water Quality and Quantity at the Local, Basin, and Regional Scales. *Transactions of the ASABE*, **60**, 1915-1916. <https://doi.org/10.13031/trans.12687>
- [11] Laura Miserendino, M. and Masi, C.I. (2010) The Effects of Land Use on Environmental Features and Functional Organization of Macroinvertebrate Communities in Patagonian Low Order Streams. *Ecological Indicators*, **10**, 311-319. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.06.008>
- [12] Zhang, Y., Zhao, R., Kong, W., Geng, S., Bentsen, C.N. and Qu, X. (2013) Relationships between Macroinvertebrate Communities and Land Use Types within Different Riparian Widths in Three Headwater Streams of Taizi River, China.

- Journal of Freshwater Ecology*, **28**, 307-328. <https://doi.org/10.1080/02705060.2013.779941>
- [13] Boonsoong, B., Sangpradub, N. and Barbour, M.T. (2009) Development of Rapid Bioassessment Approaches Using Benthic Macroinvertebrates for Thai Streams. *Environmental Monitoring & Assessment*, **155**, 129-147. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0423-2>
- [14] 殷旭旺, 韩洁, 王博涵, 金文, 杨璐, 陈海, 吴丹. 太子河流域底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 水产学杂志, 2017, 30(3): 40-44.
- [15] 王博涵, 吴丹, 张吉, 殷旭旺, 赵长森, 窦同文. 济南河流大型底栖动物摄食功能群多样性及时空动态[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7128-7139.
- [16] Finn, D.S. and Poff, N.L. (2005) Variability and Convergence in Benthic Communities along the Longitudinal Gradients of Four Physically Similar Rocky Mountain Streams. *Freshwater Biology*, **50**, 243-261. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2004.01320.x>
- [17] Morse, J.C., Yang, L. and Tian, L. (1984) Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality. Hohai University Press, Nanjing.
- [18] Merritt, R., Cummins, K. and Berg, M.B. (2010) An Introduction to the Aquatic Insects of North America. *Revista Mexicana De Biodiversidad*, **81**, 593-595.
- [19] 周长发, 苏翠荣, 归鸿. 中国蜉蝣概述[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [20] Narangarvuu, D., Oyunbileg, J., Yang, P.S. and Boldgiv, B. (2015) Distribution of Ephemeroptera, Plecoptera, and Trichoptera Assemblages in Relation to Environmental Variables in Headwater Streams of Mongolia. *Environmental Earth Sciences*, **73**, 835-847. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2968-9>
- [21] Bispo, P.C. and Oliveira, L.G. (2007) Diversity and Structure of Ephemeroptera, Plecoptera and Trichoptera (Insecta) Assemblages from Riffles in Mountain Streams of Central Brazil. *Revista Brasileira de Zoologia*, **24**, 283-293. <https://doi.org/10.1590/S0101-81752007000200004>
- [22] Birk, S., Bonne, W., Borja, A., Brucet, S., Courrat, A., Poikane, S., Solimini, A., van de Bund, W., Zampoukas, N. and Hering, D. (2012) Three Hundred Ways to Assess Europe's Surface Waters: An Almost Complete Overview of Biological Methods to Implement the Water Framework Directive. *Ecological Indicators*, **18**, 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.10.009>
- [23] Cummins, K.W. (1973) Trophic Relations of Aquatic Insects. *Annual Review of Entomology*, **18**, 183-206. <https://doi.org/10.1146/annurev.en.18.010173.001151>
- [24] Wang, J., Lu, X., Tian, J. and Jiang, M. (2008) Fuzzy Synthetic Evaluation of Water Quality of Naoli River Using Parameter Correlation Analysis. *Chinese Geographical Science*, **18**, Article No. 361. <https://doi.org/10.1007/s11769-008-0361-5>
- [25] Aura, C.M., Raburu, P.O. and Herrmann, J. (2010) A Preliminary Macroinvertebrate Index of Biotic Integrity for Bioassessment of the Kipkaren and Sosiani Rivers, Nzoia River Basin, Kenya. *Lakes & Reservoirs Research & Management*, **15**, 119-128. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1770.2010.00432.x>
- [26] Luiza-Andrade, A., Montag, L.F.D.A. and Juen, L. (2017) Functional Diversity in Studies of Aquatic Macroinvertebrates Community. *Scientometrics*, **111**, 1643-1656. <https://doi.org/10.1007/s11192-017-2315-0>
- [27] 项珍龙. 在浑太河流域水生生态系统检验中度干扰假说[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海洋大学, 2017.
- [28] Olapoju, O.A. and Edokpayi, C.A. (2018) Factors Affecting Macroinvertebrates Distribution in Badagry Creek, South Western Nigeria. *Asian Journal of Fisheries and Aquatic Research*, **1**, 1-11. <https://doi.org/10.9734/ajfar/2018/v1i3315>
- [29] 江明喜, 邓红兵, 唐涛, 蔡庆华. 香溪河流域河流中树叶分解速率的比较研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(1): 27-30.
- [30] Thomsen, A.G. and Friberg, N. (2002) Growth and Emergence of the Stonefly *Leuctra nigra* in Coniferous Forest Streams with Contrasting pH. *Freshwater Biology*, **47**, 1159-1172. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2002.00827.x>
- [31] 刘玉, Vermaat, J.E., de Ruyter, E.D., de Kruijf, H.A.M. 珠江、流溪河大型底栖动物分布和氮磷因子的相关分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2003, 42(1): 95-99.
- [32] 渠晓东. 香溪河大型底栖动物时空动态、生物完整性及小水电站的影响研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 水生生物研究所, 2006.
- [33] 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[J]. 生态学报, 2011, 22(12): 3329-3336.
- [34] Poff, L.R. (1997) Landscape Filters and Species Traits: Towards Mechanistic Understanding and Prediction in Stream Ecology. *Journal of the North American Benthological Society*, **16**, 391-409. <https://doi.org/10.1007/s102300200021>

- [35] Pardo, I. and Armitage, P.D. (1997) Species Assemblages as Descriptors of Mesohabitats. *Hydrobiologia*, **344**, 111-128.
- [36] LeRoy Poff, N., Olden, J.D., Vieira, N.K.M., Finn, D.S., Simmons, M.P. and Kondratieff, B.C. (2006) Functional Trait Niches of North American Lotic Insects: Traits-Based Ecological Applications in Light of Phylogenetic Relationships. *Journal of the North American Benthological Society*, **25**, 730-755. [https://doi.org/10.1899/0887-3593\(2006\)025\[0730:FTNONA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1899/0887-3593(2006)025[0730:FTNONA]2.0.CO;2)
- [37] Petrin, Z. (2011) Species Traits Predict Assembly of Mayfly and Stonefly Communities along pH Gradients. *Oecologia*, **167**, 513-524. <https://doi.org/10.1007/s00442-011-2003-3>
- [38] Stoertz, M.W., Bourne, H., Knotts, C. and White, M.M. (2002) The Effects of Isolation and Acid Mine Drainage on Fish and Macroinvertebrate Communities of Monday Creek, Ohio, USA. *Mine Water and the Environment*, **21**, 60-72.
- [39] Ricotta, C., Carboni, M. and Acosta, A.T. (2015) Let the Concept of Indicator Species Be Functional. *Journal of Vegetation Science*, **26**, 839-847. <https://doi.org/10.1111/jvs.12291>
- [40] Petchey, O. and Gaston, K.J. (2010) Functional Diversity (FD), Species Richness and Community Composition. *Ecology Letters*, **5**, 402-411. <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2002.00339.x>