

挠力河保护区退耕湿地大型底栖动物群落结构及多样性研究

王金武¹, 丁成¹, 王广鑫¹, 崔兴波¹, 姜海霞², 刘曼红^{2*}

¹黑龙江挠力河国家级自然保护区管理局, 黑龙江 双鸭山

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

收稿日期: 2022年5月26日; 录用日期: 2022年6月28日; 发布日期: 2022年7月5日

摘要

为研究挠力河国家级自然保护区的大型底栖动物恢复现状, 在退耕湿地和自然湿地分别设置6个采样点于2019年夏季和秋季进行大型底栖动物样本采集, 研究结果表明, 采集到的大型底栖动物隶属于3门6纲16目35科72种, 其中昆虫纲种类最多。对夏季和秋季退耕湿地与自然湿地的优势种进行配对样本t检验, 发现差异性均显著($P < 0.05$)。夏季的共有优势种为: 乌苏里圆田螺(*Cipangopaludina ussuriensis*)和多足摇蚊属一种(*Polypedilum* sp.); 秋季为多足摇蚊属一种、摇蚊属一种(*Chironomus* sp.)和划蝽科的(*Graptocorixini* sp.)。夏季退耕湿地Shannon-Wiener多样性指数(H')和Margalef丰富度指数(d)的最高值均出现在样点S6, 分别为2.203和3.234; 分别低于自然湿地(2.631和4.645)。秋季退耕湿地生物多样性指数 H' 、 d 的最高值分别为2.623和4.215, 高于自然湿地(1.824, 3.107), 夏季自然湿地摄食功能群的种类数及个体数均大于退耕湿地。退耕湿地中, 撕食者具有一定的优势。自然湿地捕食者和撕食者均占优势。秋季自然湿地与退耕湿地物种丰富度差异并不明显, 仅撕食者在退耕湿地数量多于自然湿地。为了揭示不同调查断面大型底栖动物群落的差异, 以各调查断面大型底栖动物的摄食功能群数据构建Bray-Curtis相似矩阵, 若以80%的相似性来划分, 将夏季退耕湿地和自然湿地共12个调查断面分为三组, 聚类分组表明, 组内的各断面大型底栖动物群落摄食功能群的相似性较高, 其中S2和S4相似性最高, 达到90%以上。

关键词

挠力河国家级自然保护区, 大型底栖动物, 群落结构, 摄食功能群, 聚类分析

Study on the Community Structure and Biodiversity of Macroinvertebrates in Reclaimed Wetlands of Naolihe Reserve

Jinwu Wang¹, Cheng Ding¹, Guangxin Wang¹, Xingbo Cui¹, Haixia Jiang², Manhong Liu^{2*}

*通讯作者。

文章引用: 王金武, 丁成, 王广鑫, 崔兴波, 姜海霞, 刘曼红. 挠力河保护区退耕湿地大型底栖动物群落结构及多样性研究[J]. 环境保护前沿, 2022, 12(4): 685-694. DOI: 10.12677/aep.2022.124087

¹Heilongjiang Naolihe National Nature Reserve Administration, Shuangyashan Heilongjiang

²College of Wildlife and Protected Areas, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang

Received: May 26th, 2022; accepted: Jun. 28th, 2022; published: Jul. 5th, 2022

Abstract

In order to explore the recovery of macroinvertebrates in Naolihe National Nature Reserve, 6 sampling sites were set up in reclaimed wetlands and natural wetlands respectively, samples of macroinvertebrates were collected in summer and autumn, 2019. The results of research showed that: The macroinvertebrates collected belonged to 72 species, 35 families, 16 orders, 6 classes, 3 phyla, among which insecta had the most species. Matched samples t-test was performed on the dominant species between reclaimed wetlands and natural wetlands in summer and autumn, and significant differences were found ($P < 0.05$). The common dominant species in summer were *Cipangopaludina ussuriensis* and *Polypedilum* sp.; and in autumn, were *Chironomus* sp. and *Graptocorixini* sp. The maximum values of Shannon-Wiener index (H') and Margalef index (d) of reclaimed wetlands all appeared at sampling site S6, were 2.203 and 3.234, respectively, which were lower than those of natural wetlands (2.631 and 4.645). The maximum values of Shannon-Wiener index and Margalef index of reclaimed wetlands were 2.623 and 4.215, respectively, higher than those of natural wetlands (1.824 and 3.107). The number of species and individuals of functional feeding groups in natural wetlands in summer was larger than that in reclaimed wetlands. In reclaimed wetlands, predators have certain advantages. Both predators and shredders were dominant in natural wetlands. There was no significant difference in species richness between natural wetlands and reclaimed wetlands in autumn, only the number of predators in reclaimed wetlands was more than that in natural wetlands. In order to reveal the difference of macroinvertebrates communities in different survey sections, Bray-Curtis similarity matrix was constructed with data of macroinvertebrates functional feeding groups in all survey sections. With 80% similarity as the standard of division, a total of 12 survey sections of summer deserted wetlands and natural wetlands were divided into three groups. Group clustering showed that similarities of functional feeding groups in every survey sections were high, among them, sampling site S2 and sampling site S4 had the highest similarities, reaching more than 90%.

Keywords

Naolihe National Nature Reserve, Macroinvertebrates, Community Structure, Functional Feeding Groups, Cluster Analysis

Copyright © 2022 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

长期的、过度开展的农业活动给湿地的景观特征造成了非常明显的改变[1], 因为农田等斑块的存在, 湿地呈现破碎化趋势[2], 湿地的各项生态功能遭受破坏, 生物多样性受损。挠力河湿地近年来受到大规模的开垦和建设, 人为干扰情况严重, 湿地景观破碎化、水位下降、农业活动副产物及工业三废对湿地造成污染等原因[3], 使挠力河湿地生态系统变得脆弱, 生物多样性下降。

大型底栖动物(Macroinvertebrates)是指生活史的全部或部分时间聚居于水体底部的、体型大于 0.5 mm

的水生动物类群[4]，其群落结构及多样性组成与生境间有非常密切的关系，在湿地水生态系统中物质循环和能量流动具有不可替代的作用[5] [6]。挠力河国家级自然保护区自 2014 年起，对挠力河流域湿地开展了退耕还湿工作，耕地面积逐年减少，湿地生态及水文功能得到改善，利于大型底栖动物群落的恢复与重建。大型底栖动物具有对环境敏感的特性，多用于水环境监测，部分底栖动物对环境具有指示性作用[7]。生境的变化会对大型底栖动物的群落结构产生一定影响[8]，但当前利用大型底栖动物为指示生物反映退耕湿地恢复状况的研究较少。本研究通过对挠力河退耕后湿地大型底栖动物群落结构及多样性的研究，监测退耕湿地的恢复状况，以期开展下一步湿地保护工作提供理论依据。

2. 材料与方法

2.1. 研究地概况

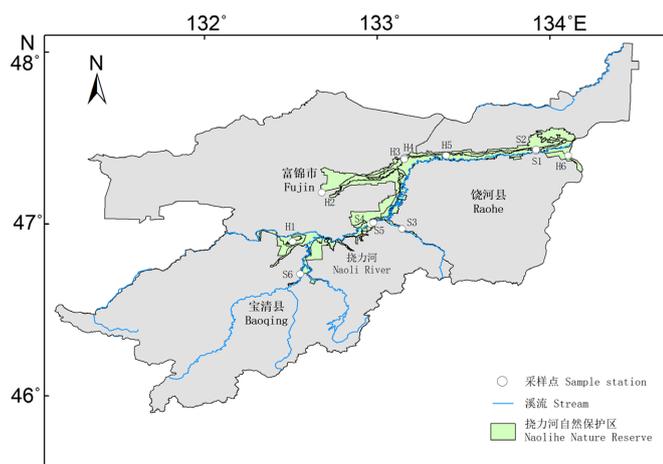
挠力河湿地位于挠力河国家级自然保护区内(132°22'~134°13'E, 46°30'~47°24'N) [9]，是三江平原保存较为完好的四个典型湿地之一[10]，为温带半湿润型大陆性季风气候[11] [12]，年均气温为 2.3℃~2.7℃，降水主要集中在 6~9 月，年均降雨量为 537.4 mm [10]。自 2014 年挠力河保护区实施退耕还湿工程以来[3]，退耕面积总计达 1672 ha。挠力河湿地常见的景观类型有：沼泽湿地(包含深水沼泽和潜水沼泽)、塔头苔草群落和森林等[12] [13]。

2.2. 大型底栖动物采集与鉴定

根据挠力河保护区开展的退耕还湿活动，将湿地划分为退耕区和自然区两个研究区域，并分别选取了 6 个具有代表性的采样点。其中，退耕区(S1~S6)包含了胜利农场、红旗岭农场和八五二农场，自然区(H1~H6)涵盖了五九七农场、七星河、创业农场、红卫农场和饶河农场(表 1)。根据研究地气候条件及降水情况，选择在 2019 年夏季和秋季深入样地进行大型底栖动物的采集。

Table 1. Sampling sites situation

表 1. 采样点情况



| 采样点 | 地理坐标 | 环境特征 |
|-----|----------------------------|----------------------------------|
| S1 | 133°57'47"E, 47°16'31"N | 水质较清澈，周围河岸植被种类较多，有水生植被等小栖境，水量较大。 |
| S2 | 133°57'58"E, 47°16'53"N | 水质较清澈，周围河岸植被种类较多，人为干扰较少，水量一般。 |

Continued

| | | |
|----|----------------------------|---|
| S3 | 133°12'26"E, 46°49'55"N | 水质较清澈, 周围河岸植被种类较多, 有水生植被等小栖息境, 河道人为干扰较少, 水量一般。 |
| S4 | 133°1'43"E, 46°51'37"N | 水质较清澈, 周围河岸植被种类较多, 有水生植被等小栖息境, 水量一般。 |
| S5 | 133°2'41"E, 46°52'1"N | 水质较清澈, 周围河岸植被种类较多, 有水生植被等小栖息境, 河水淹没 25%~75%的河道。 |
| S6 | 132°37'49"E, 46°34'29"N | 水质浑浊, 河岸周围几乎无植被, 底质以淤泥为主, 水量一般, 河水淹没 25%~75%的河道。 |
| H1 | 132°35'14"E, 46°45'32"N | 水质较清澈, 周围河岸植被种类多, 植被覆盖率在 50%以上, 河道人为干扰较少, 水量较大。 |
| H2 | 132°45'12"E, 47°2'14"N | 水质较清澈, 周围河岸植被种类多, 渠道化较少, 桥墩等对水生生物影响较小, 水量较大。 |
| H3 | 133°13'15"E, 47°13'59"N | 水质清澈无异味, 有水生植被等小栖息境, 河道维持正常模式, 河水淹没 75%左右的河道。 |
| H4 | 133°13'10"E, 47°13'36"N | 水质清澈无异味, 有水生植被等小栖息境, 河道维持正常模式, 河水淹没 75%左右的河道。 |
| H5 | 133°27'22"E, 47°14'51"N | 水质清澈无异味, 有水生植被等小栖息境, 底质有 50%~75%是碎石、卵石、大石, 水量大, 水流类型全面。 |
| H6 | 134°8'49"E, 47°14'55"N | 水质较清澈, 周围河岸植被种类较多, 河道维持正常模式, 人为干扰较少, 水量较大。 |

使用矩形抄网(尺寸 0.3 m * 0.2 m, 60 目尼龙纱)和彼得生采泥器(1/16 m²)进行挠力河湿地大型底栖动物的采集。采样点的生境情况包括芦苇荡、森林、苔草沼泽等, 也有采样点与农田毗邻, 因而采样点的底质类型多样, 包括砂石底、淤泥、泥底等。在每个采样点中, 选择尽可能多的小生境类型进行采样。在浅水区的采样通过矩形抄网进行, 每个样点的采集面积总计为 1 m²; 在水深超过 1 m 的软沙底质深水区使用彼得生采泥器进行采样。将采集到的样品通过 40 目分样筛洗涤淤泥, 在白瓷盘中进行大型底栖动物的挑选后, 即刻放入质量分数为 85% 的酒精中保存。

在实验室中, 主要使用解剖镜和显微镜进行物种鉴定。依据 Morse [14]、归鸿[15]、周长发[16]、刘月英[17]等的文献资料将大多数样本鉴定至种, 少数鉴定至科或属的水平。

2.3. 大型底栖动物摄食功能群的划分

参考 Cummins [18] [19]、Poff [20]、蒋万祥[21]、刘建康[22]、Yoshimura [23]等的文献书籍, 并依据挠力河湿地的实际情况, 按照大型底栖动物的取食方式和策略, 共划分出 6 种摄食功能群: 直接集食者(Gatherer-Collector, GC), 刮食者(Scraper, SC), 捕食者(Predator, PR), 撕食者(Shredder, SH), 滤食收集者(Filterer-Collector, FC)和杂食者(Omnivore, OM)。

2.4. 数据处理与分析

2.4.1. 生物多样性指数及评价标准

对挠力河退耕湿地大型底栖动物群落特征的分析采用 Shannon-Wiener 多样性指数(H') [24]和 Margalef 丰富度指数(d) [25]。并通过优势度指数(Y) [26]对挠力河湿地大型底栖动物优势种进行分析。

2.4.2. 群落聚类分析

在 PAST(326b, USA)环境下, 对不同样点大型底栖动物摄食功能群进行非加权组平均法(Unweighted Pair Group Method with Arithmetic Mean, UPGMA)构建 Bray-Curtis 相似矩阵。

3. 研究结果

3.1. 大型底栖动物物种组成与摄食功能群划分

于 2019 年夏、秋季, 深入挠力河国家级自然保护区进行大型底栖动物的采样。共设置 12 个采样点, 采集到的大型底栖动物隶属于 3 门 6 纲 16 目 35 科 72 种, 采集数量共计 1187 个。其中, 节肢动物门(Arthropoda)种类数最多, 为 49 种, 而软体动物门和环节动物门种类数较少, 分别为 12 种和 11 种。从种类数上来看, 昆虫纲(Insecta)种类最多, 为 47 种(65%); 其次是腹足纲(Gastropoda)10 种(14%); 再次是蛭纲(Hirudinea) 6 种(8%); 寡毛纲(Oligochaeta)共计 5 种(7%); 双壳纲(Bivalvia)和甲壳纲(Crustacea)最少, 均只有 2 种(3%)。

从数量上看, 昆虫纲具有最明显的优势, 总计采集到样本 770 个(64.87%); 腹足纲次之, 共 313 个(26.37%); 蛭纲共采集到 41 个(3.45%); 瓣鳃纲共计 26 个(2.19%); 甲壳纲共计 19 个(1.6%); 寡毛纲共 18 个(1.52%)。

3.2. 大型底栖动物优势种分析

退耕湿地与自然湿地大型底栖动物优势种

水生态系统不同区域大型底栖动物群落结构可以通过大型底栖动物优势种得到反映[27]。在调查期间, 夏秋两季共有的优势种为多足摇蚊属一种(*Polypedilum* sp.)。分别对夏季和秋季挠力河自然保护区退耕湿地与自然湿地的大型底栖动物优势种进行成对样本 t 检验, 发现差异性均显著($P < 0.05$)。夏季退耕湿地与自然湿地的共有优势种为: 乌苏里圆田螺(*Cipangopaludina ussuriensis*)和多足摇蚊属一种(*Polypedilum* sp.); 秋季退耕湿地与自然湿地的共有优势种为: 多足摇蚊属一种(*Polypedilum* sp.)、摇蚊属一种(*Chironomus* sp.)和划蝽科的(*Graptocorixini* sp.)。

Table 2. Dominant macroinvertebrates species in reclaimed wetlands and natural wetlands

表 2. 退耕湿地与自然湿地大型底栖动物优势种

| 季节 | 湿地类型 | 优势种 | 优势度值 Y |
|----|------|---|--------|
| 夏季 | 退耕湿地 | 椭圆萝卜螺 <i>Radix swinhoei</i> | 0.122 |
| | | 雕翅摇蚊属一种 <i>Glyptotendipes</i> sp. | 0.091 |
| | | 多足摇蚊属一种 <i>Polypedilum</i> sp. | 0.042 |
| | | 乌苏里圆田螺 <i>Cipangopaludina ussuriensis</i> | 0.021 |
| | 自然湿地 | 乌苏里圆田螺 <i>Cipangopaludina ussuriensis</i> | 0.037 |
| | | 鱼盘螺 <i>Vavata piseinatis</i> | 0.027 |
| | | 多足摇蚊属一种 <i>Polypedilum</i> sp. | 0.025 |
| | | 椭圆萝卜螺 <i>Radix swinhoei</i> | 0.024 |
| 秋季 | 退耕湿地 | 多足摇蚊属一种 <i>Polypedilum</i> sp. | 0.193 |
| | | 摇蚊属一种 <i>Chironomus</i> sp. | 0.070 |
| | | <i>Graptocorixini</i> sp. | 0.056 |
| | | <i>Micronecta sedula</i> | 0.032 |

Continued

| | | | |
|----|------|-----------------------------------|-------|
| | | 多足摇蚊属一种 <i>Polypedilum</i> sp. | 0.221 |
| | | 摇蚊属一种 <i>Chironomus</i> sp. | 0.155 |
| 秋季 | 自然湿地 | <i>Graptocorixini</i> sp. | 0.119 |
| | | 雕翅摇蚊属一种 <i>Glyptotendipes</i> sp. | 0.063 |
| | | 恩非摇蚊属一种 <i>Einfeldia</i> sp. | 0.032 |

3.3. 大型底栖动物生物多样性指数

2019 年夏、秋季挠力河国家级自然保护区退耕湿地和自然湿地各样点 Shannon 多样性指数(H')和 Margalef 丰富度指数(d)如表 3 所示。

Table 3. Biodiversity Index of the Naolihe nature reserve in summer and autumn

表 3. 夏、秋季挠力河自然保护区生物多样性指数

| 采样点 | 夏季 | | 秋季 | |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| | H' | d | H' | d |
| S1 | 1.768 | 2.502 | 1.116 | 1.137 |
| S2 | 0 | 0 | 1.718 | 2.127 |
| S3 | 1.862 | 2.118 | 0 | 0 |
| S4 | 0 | 0 | 1.537 | 2.256 |
| S5 | 0.831 | 0.78 | 1.57 | 2.056 |
| S6 | 2.203 | 3.234 | 2.623 | 4.215 |
| H1 | 2.631 | 4.445 | 1.04 | 1.443 |
| H2 | 1.04 | 1.443 | 1.508 | 2.206 |
| H3 | 2.301 | 3.649 | 1.534 | 1.938 |
| H4 | 2.47 | 4.645 | 1.663 | 2.042 |
| H5 | 2.003 | 3.234 | 1.824 | 3.107 |
| H6 | 0.109 | 0.264 | 0.193 | 0.463 |

在夏季,对于退耕湿地,生物多样性指数 H' 和 d 的最高值均出现在样点 S6,分别为 2.203 和 3.234;对于自然湿地, H' 的最高值出现在 H1,为 2.631,而 d 的最高值均出现在 H4,分别为 4.645。

在秋季,对于退耕湿地,生物多样性指数 H' 、 d 的最高值均出现在样点 S6,分别为 2.623 和 4.215;对于自然湿地,所有指数的最高值均出现在 H5,分别为 1.824 和 3.107。

3.4. 大型底栖动物摄食功能群分析

摄食功能群具有反映大型底栖动物群落结构特征的能力[27]。如图 1,在夏季,挠力河湿地采集到的所有类型摄食功能群中,自然湿地摄食功能群的种类数及个体数均大于退耕湿地。自然湿地捕食者种类数具有非常明显的优势(22 种),而采集到的个体数则是撕食者占优(201 个)。退耕湿地中,撕食者在种类数(10 种)和个体数(74 个)上均具有一定的优势。

在秋季，自然湿地与退耕湿地在种类数上的差异并不明显，甚至退耕湿地的捕食者(17种)和撕食者(6种)的种类数均大于自然湿地。对于采集到的摄食功能群个体数，仅撕食者在退耕湿地数量(32个)多于自然湿地。

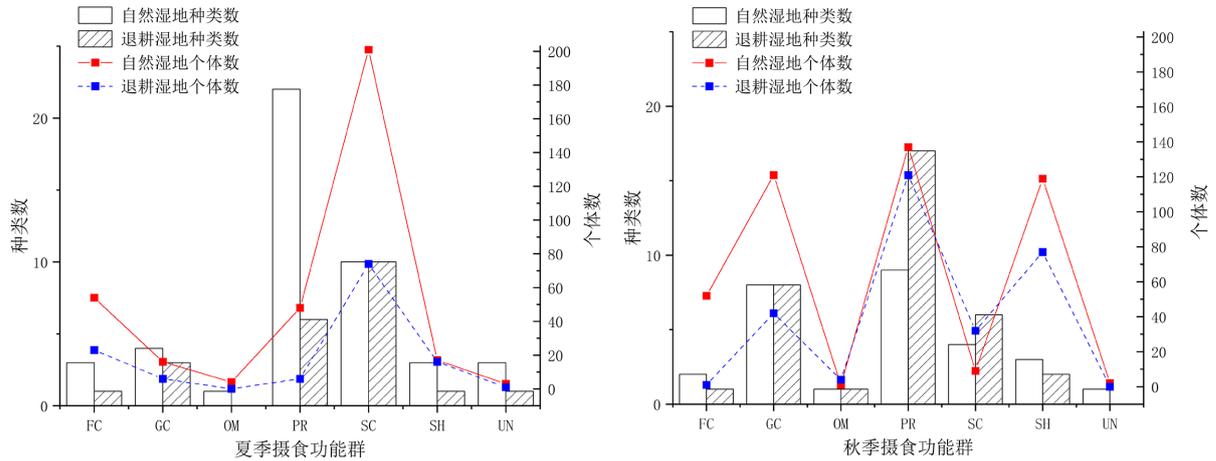


Figure 1. Species and individual number of FFGs in summer and autumn
图 1. 夏季、秋季摄食功能群种类数及个体数

3.5. 大型底栖动物功能群聚类分析

为了探究挠力河国家级自然保护区退耕湿地大型底栖动物恢复状况，在 R 环境下，对夏、秋两季退耕湿地和自然湿地不同样点大型底栖动物摄食功能群采用非加权组平均法(UPGMA)进行聚类分析。

为了揭示不同调查断面大型底栖动物群落的差异，以各调查断面大型底栖动物的摄食功能群数据构造 Bray-Curtis 相似矩阵，结果如图 2 所示。若以 80%的相似性来划分，夏季(7月)12个调查断面分成3组，第1组包括 S2 和 S4；第2组包括 H5、H3、S6、H1、H4、H6 和 S3；第3组包括 S5、H2 和 S1。这些调查断面的聚类分组表明，组内的各断面大型底栖动物群落摄食功能群的相似性较高，S2 和 S4 相似性最高，达到 90%以上。

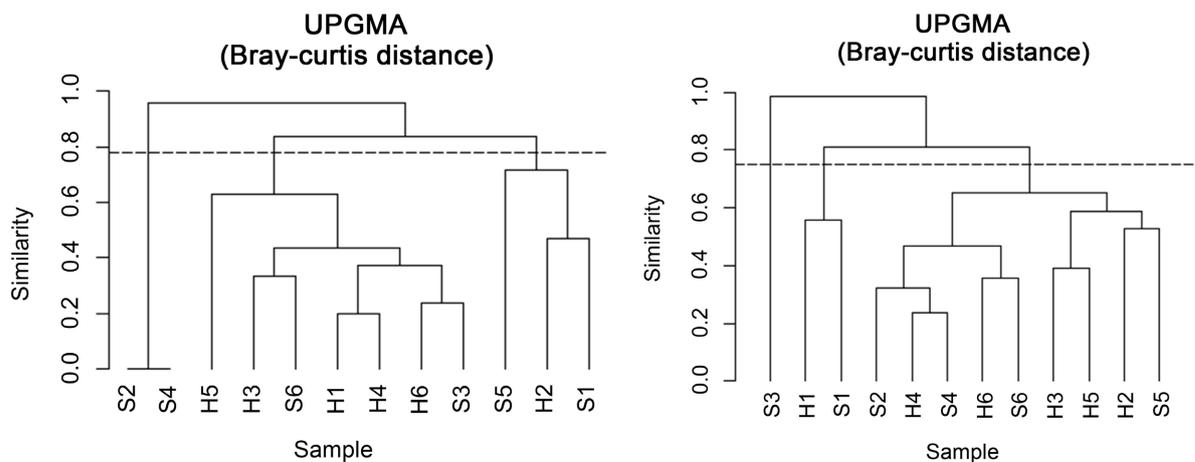


Figure 2. Cluster analysis dendrogram of benthic functional feeding groups (based on Bray-Curtis similarity coefficient) in 12 survey sections (the left picture is July, the right picture is October)

图 2. 12 个调查断面大型底栖动物摄食功能群聚类分析树状图(基于 Bray-Curtis 相似性系数)(左图为 7 月，右图为 10 月)

4. 讨论

大型底栖动物种类组成及群落结构关于黑龙江大型底栖动物的研究相对较少, 陈其羽[28]于 20 世纪 50 年代最早报道黑龙江黑河段大型底栖动物为 17 科, 其调查表明黑龙江中上游的大型底栖动物在不同河段, 其大型底栖动物的组成、数量都有明显的差别, 这与本研究结果相似。这可能是由于时间的推移, 水域生态环境发生改变, 该河段大型底栖动物中节肢动物种类和数量比重增大, 为 49 种。本次调查所采集到的 72 种大型底栖动物, 基本上涵盖了相关研究的调查种类。

水生态系统不同区域大型底栖动物群落结构可以通过大型底栖动物优势种得到反映[29]。由于黑龙江地处北方高寒地区, 在秋季, 冷水性大型底栖动物种类较多, 如多足摇蚊属一种(*Polypedilum* sp.)、摇蚊属一种(*Chironomus* sp.)为主要优势物种。而夏季退耕湿地与自然湿地的共有优势种为: 乌苏里圆田螺和多足摇蚊属一种; 秋季退耕湿地与自然湿地的共有优势种为: 多足摇蚊属一种、摇蚊属一种和划蝽科的。温度直接影响大型底栖动物群落分布[30]。寡毛类和摇蚊类以幼虫越冬, 春季摇蚊幼虫羽化较少, 而生物量最低。随着温度的上升, 大型底栖动物种类和数量增多, 到了秋末北方地区水温下降很快, 稀有种出现较少。

黑龙江挠力河自然保护区大型底栖动物群落结构的聚类分析表明, 12 个调查断面夏季分成 3 组、秋季分成 4 组, 但群落结构相似性程度较高。这是由于研究流域生态环境存在差异, 形成不同的生境, 导致各个断面大型底栖动物群落结构存在差异。大型底栖动物多样性指数也存在季节差异, 在夏季, 退耕湿地最高值均出现在样点 S6; 自然湿地, H' 的最高值出现在 H1, 而 d 最高值均出现在 H4。在秋季, 退耕湿地最高值均出现在样点 S6, 自然湿地, 所有指数的最高值均出现在 H5。多样性指数与大型底栖动物的密度和种类组成直接相关[31], 自然湿地的物种丰富度高于退耕湿地, 且夏季的丰富度高于秋季。

在夏季, 自然湿地摄食功能群的种类数及个体数均大于退耕湿地。自然湿地捕食者种类数具有非常明显的优势, 退耕湿地中, 撕食者在种类数和个体数上均具有一定的优势, 由于退耕湿地植被郁闭度较低, 湿地中枯枝落叶等撕食者食物较之自然湿地明显减少, 限制了撕食者的生存; 在秋季, 自然湿地与退耕湿地在种类数上的差异并不明显, 仅撕食者在退耕湿地数量多于自然湿地[32]。

5. 结论

在对挠力河国家级自然保护区的大型底栖动物恢复现状的研究中, 主要得到以下结论:

1) 在调查期间, 夏秋两季共有的优势种为多足摇蚊属一种(*Polypedilum* sp.)。夏季和秋季退耕湿地与自然湿地大型底栖动物优势种差异性均显著($P < 0.05$)。夏季退耕湿地与自然湿地的共有优势种为: 乌苏里圆田螺(*Cipangopaludina ussuriensis*)和多足摇蚊属一种; 秋季退耕湿地与自然湿地的共有优势种为: 多足摇蚊属一种、摇蚊属一种(*Chironomus* sp.)和划蝽科的(*Graptocorixini* sp.)。

2) 夏季和秋季对于退耕湿地, 生物多样性指数 H'、d 的最高值均出现在样点 S6, 为保护区大型底栖动物的热点区域, 秋季自然湿地 H5 两个生物指数最高。

3) 自然湿地捕食者种类数具有非常明显的优势(22 种), 并且种类数和个体数均大于退耕湿地, 撕食者个体数量上占优。退耕湿地撕食者在种类数(10 种)和个体数上均具有一定的优势。

4) 大型底栖动物的摄食功能群构建的 Bray-Curtis 相似矩阵, 以 80% 的相似性来划分, 聚类分组表明, 组内的各断面大型底栖动物群落摄食功能群的相似性较高, 其中 S2 和 S4 相似性最高, 达到 90% 以上。

参考文献

- [1] 韩明浩, 刘赢男, 周丹, 隋心, 倪红伟, 穆立蓄. 农业活动对三江平原湿地主要植物种群生态位的影响[J]. 植物研究, 2017, 37(3): 461-467.

- [2] 赵锐锋, 姜朋辉, 赵海莉, 樊洁平. 黑河中游湿地景观破碎化过程及其驱动力分析[J]. 生态学报, 2013, 33(14): 4436-4449. <https://doi.org/10.5846/stxb201204260595>
- [3] 崔兴波, 刘曼红, 马玉堃. 黑龙江挠力河国家级自然保护区退耕还湿工程及效益分析[J]. 黑龙江科学, 2016, 7(19): 153-155.
- [4] 段学花, 王兆印, 徐梦珍. 底栖动物与河流生态评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [5] 段学花, 王兆印, 程东升. 典型河床底质组成中底栖动物群落及多样性[J]. 生态学报, 2007, 27(4): 1664-1672.
- [6] 陈国贵, 王文卿, 谷宣, 洪伟, 林宇枫, 王瑁. 漳江口红树植物群落周转对大型底栖动物群落结构的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(11): 4310-4317.
- [7] 王昱, 李宝龙, 冯起, 王之君, 刘蔚, 张昕雨, 孔德星, 左一锋. 黑河重金属空间分布及与大型底栖动物的关系[J]. 中国环境科学, 2021, 41(3): 1354-1365.
- [8] 徐霖林, 马长安, 田伟, 吕巍巍, 赵云龙. 淀山湖沉水植物恢复重建对底栖动物的影响[J]. 复旦学报(自然科学版), 2011, 50(3): 260-267.
- [9] 刘子刚, 王琦, 彭爱珺, 杨飞. 基于 PSM 和 DID 法的湿地自然保护区保护效果分析——以黑龙江省三江和挠力河国家级自然保护区为例[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2019, 49(1): 54-61.
- [10] Liu, J.W., Wang, T. and Qiang, Z. (2018) Ecological Water Requirements of Wetlands in the Middle and Lower Reaches of the Naoli River. *Water Policy*, 20, 777-793. <https://doi.org/10.2166/wp.2018.099>
- [11] 邹红菲, 朱井丽, 吴庆明, 闫晗, 董海艳. SD 法在保护区旅游景观评价中的尝试——以挠力河保护区为例[J]. 野生动物学报, 2016, 37(3): 271-276.
- [12] 刘曼红, 孟瑶, 曹晶晶, 崔兴波, Nagam, A.M. 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.
- [13] 张敬东, 王思宏. 塔头苔草及其根区土壤中重金属元素分布研究[J]. 延边大学学报(自然科学版), 2013, 39(1): 47-49.
- [14] Morse, J.C., Yang, L.F. and Tian, L.X. (1994) *Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality*. Nanjing: HoHai University Press.
- [15] 归鸿, 尤大寿. 中国经济昆虫志, 第四十八册, 蜉蝣目[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [16] 周长发, 苏翠蓉, 归鸿. 中国蜉蝣概述[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [17] 刘月英, 张文珍, 王跃先, 等. 中国经济动物志, 淡水软体动物[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [18] Cummins, K.W. and Klug, M.J. (1979) Feeding Ecology of Stream Invertebrates. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 10, 147-172. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.10.110179.001051>
- [19] 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>
- [20] Poff, N.L., Olden, J.D., Vieira, N.K.M., Finn, D.S., Simmons, M.P., 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)
- [21] 蒋万祥, 蔡庆华, 唐涛, 渠晓东. 香溪河水系大型底栖动物功能摄食类群生态学[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5207-5218.
- [22] 刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [23] Yoshimura, C., Tockner, K., Omura, T. and Moog, O. (2006) Species Diversity and Functional Assessment of Macroinvertebrate Communities in Austrian Rivers. *Limnology*, 7, 63-74. <https://doi.org/10.1007/s10201-006-0170-4>
- [24] Shannon, C.E. and Weaver, W. (1963) The Mathe-Matical Theory of Communciation. Univerdity of Illonois, Illonois.
- [25] Greig-Smith, P. (1968) Rreview: *Perspective in Ecological Theory* by R. Margalef. *Journal of Ecology*, 59, 308-309. <https://doi.org/10.2307/2258471>
- [26] Aksnes, D.L. and Wassmann, P. (1993) Modeling the Significance of Zooplankton Grazing for Export Production. *Journal of Ecology*, 38, 978-985. <https://doi.org/10.4319/lo.1993.38.5.0978>
- [27] 于琪, 王珂, 郭杰, 孙晓梅, 刘绍平, 段辛斌, 陈大庆. 长江下游莲花洲港大型底栖动物摄食功能群时空分布及其影响因子[J]. 淡水渔业, 2021, 51(2): 47-54.
- [28] 陈其羽. 黑龙江的底栖动物及水利枢纽建成后的预报[J]. 水生生物学集刊, 1959, 5(2): 147-156.
- [29] 苏华武, 江晶, 温芳妮, 李晓宇, 闫云君. 湖北清江流域叹气沟河底栖动物群落结构与水质生物学评价[J]. 湖泊

- 科学, 2008, 20(4): 520-528.
- [30] Belinda, W.T., Martin, J.R. and Jonathan, S.S. (2003) Cost-Efficient Methods for Marine Pollution Monitoring at Casey Station, East Antarctica: The Choice of Sieve Mesh-Size and Taxonomic Resolution. *Marine Pollution Bulletin*, **46**, 232-243. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00366-1](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00366-1)
- [31] 安传光, 赵云龙, 林凌, 吕敢堂, 陈亚瞿. 长江口九段沙潮间带大型底栖动物季节分布特征的初步研究[J]. 水产学报, 2007, 31(z1): 52-58.
- [32] 蒋万祥, 贾兴焕, 唐涛, 蔡庆华. 底栖动物功能摄食类群对酸性矿山废水的响应[J]. 生态学报, 2016, 36(18): 5670-5681. <https://doi.org/10.5846/stxb201504140760>