

松花江干流大型底栖动物群落结构与水质生物评价*

霍堂斌^{1,2} 刘曼红¹ 姜作发² 李 喆² 马 波² 于洪贤^{1**}

(¹东北林业大学, 哈尔滨 150040; ²中国水产科学研究院黑龙江水产研究所/农业部黑龙江流域渔业资源与环境重点野外科学观测试验站, 哈尔滨 150070)

摘 要 于2010年春季(4—5月)、夏季(7—8月)和秋季(9—11月),对松花江干流大型底栖动物群落结构进行调查研究,并利用生物指数对松花江干流水质进行评价.共采集到大型底栖动物16目36科116种,其中水生昆虫种类最多,为74种,属6目21科,占总数63.8%,年平均密度为 $66.80 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$ 、生物量为 $24.30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$.春、夏、秋季的平均密度以春季最高($90.52 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$),秋季($61.26 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$)次之,夏季($48.63 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$)最低;平均生物量以秋季最高($35.35 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$),夏季($23.12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)次之,春季($14.41 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)最低. Shannon指数、Pielou均匀度指数、Simpson指数均以春季最高,夏季与秋季相近.各断面微生境共有种不多,物种相似性不高,最大仅为60%;功能摄食群种类数相近,共有撕食者26种,收集者32种,刮食者28种,捕食者30种.采用BI生物指数和FBI生物指数对松花江干流水质的评价结果基本一致,并与化学监测结果基本吻合.松花江干流哈尔滨断面以上水质一般,哈尔滨以下断面水质在不同时期处于污染或严重污染状态.推测大顶子山航电枢纽的修建已对大型底栖动物的物种组成、群落结构造成了较大影响.

关键词 松花江干流 大型底栖动物 群落结构 生物监测 水质

文章编号 1001-9332(2012)01-0247-08 **中图分类号** Q178, Q958 **文献标识码** A

Macrobenthos community structure of macrobenthos and bioassessment of water quality in main stream of Songhua River. HUO Tang-bin^{1,2}, LIU Man-hong¹, JIANG Zuo-fa², LI Zhe², MA Bo², YU Hong-xian¹ (¹Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; ²Ministry of Agriculture Key Field Scientific Observation Station of Fisheries Resources and Environment in Heilongjiang River Valley, Heilongjiang River Fisheries Research Institute, Harbin 150070, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2012, 23(1): 247-254.

Abstract: An investigation was conducted on the community structure of macrozoobenthos in the main stream of Songhua River in spring (April and May), summer (July and August), and autumn (from September to November), and the water quality of the main stream was assessed with biotic indices. A total of 116 species of macrobenthos were collected, belonging to 36 families and 16 orders, among which, aquatic insects had the largest number, with 74 species (63.8% of the total) belonging to 21 families and 6 orders. The annual average density and biomass of the macrobenthos were $66.80 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$ and $24.30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively. The average density was the highest ($90.52 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$) in spring, followed by in autumn ($61.26 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$), and in summer ($48.63 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$), while the average biomass was the highest ($35.35 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) in autumn, followed by in summer ($23.12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$), and in spring ($14.41 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$). The Shannon index, Pielou index, and Simpson index were the highest in spring, and were nearly the same in summer and autumn. Few species inhabited in the same types of microhabitats in all river sections. The species similarity in all sections was lower, with the largest similarity being only 60%. The species quantity of each functional feeding group was near, with 26 shredders, 32 collectors, 28 scrapers, and 30 predators. The water quality assessed with biotic index (BI) and family biotic index (FBI) was ba-

* 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(201011)、环保部全国生物物种资源联合执法检查 and 调查项目(物种10-二-13)、黑龙江省冷水性鱼类种质资源及增殖重点开放实验室项目(201006)、公益性行业(农业)科研专项(200903048-06)中国水产科学研究院冷水性鱼类增殖生物学与鱼类生理学重点开放实验室项目(201006)资助.

** 通讯作者. E-mail: china_yhx@163.com

2011-04-12 收稿, 2011-11-08 接受.

sically coincident with each other, and was accordant with chemical monitoring. The water quality above the Harbin Section of Songhua River was fair, and that below the Harbin Section was contaminated or seriously contaminated. It was presumed that the macrobenthos species composition and community structure had been affected due to the building of ship-electricity hinge in Dadingzi Mountain.

Key words: Songhua River main stream; macrobenthos; community structure; biomonitoring; water quality.

大型底栖动物生命周期较长,行动缓慢,分布广泛,作为水生态系统的重要组分,对生态系统的物质循环和能量流动过程有重要作用^[1]. 此外,其对环境变化较为敏感,不同种类底栖动物对环境条件的适应性及对污染等不利因素的耐受力 and 敏感程度不同^[2],因此底栖动物的种群结构、优势种类、现存量等参数可以反映环境因素的长期变化^[3]. 20 世纪 70 年代在北美和欧洲已广泛应用大型底栖动物群落结构对河流水质进行生态学评价^[4-5],并取得较大进展. 我国也从 20 世纪 90 年开始此方面的研究.

松花江是黑龙江我国一侧重要支流,该流域拥有我国最早建立起的重工业基地,同时也是我国重要的粮食主产区. 随着工农业生产的迅猛发展,沿江排放的各种污染物日益增多,导致松花江水环境遭受严重污染,已成为东北地区老工业基地振兴与可持续发展的障碍^[6]. “九五”以来,黑龙江省加大了对松花江污染的治理,并取得了一定成效,松花江水质污染恶化趋势开始得到控制^[7],但目前个别断面在一定时期污染仍然比较严重. 由于多种原因,松花江流域的高锰酸盐指数浓度居全国七大水系之首^[8]. 关于大型底栖动物群落结构及水质的生物学评价的研究,目前主要局限于松花江哈尔滨段^[9-12]和松花江下游^[13],尚未对松花江干流进行全面、系统的研究. 本研究以 2010 年松花江干流大型底栖动物生态调查为依据,分析松花江干流大型底栖动物群落结构和时空动态,并结合相关水质理化指标,探讨大型底栖动物对松花江干流各断面水质状况的反映程度.

1 研究方法

1.1 样品采集与处理

2010 年 4—11 月,分春(4—5 月)、夏(7—8 月)、秋(9—11 月)3 个季节对松花江干流三岔河断面至同江断面(45° 26. 430'—47° 42. 359' N, 124°42. 346'—132°31. 301' E)的大型底栖动物进行了调查. 根据松花江干流生境特点,共设置 9 个调查断面,在上游(三岔河至哈尔滨段)设置 3 个调查断

面(S₁、S₂、S₃),在中游(哈尔滨至佳木斯段)设置 4 个调查断面(S₄、S₅、S₆、S₇),在下游(佳木斯至同江段)设置 2 个调查断面(S₈、S₉),具体分布见图 1. 采样时用 GPS 定位,每个调查断面分别进行大型底栖动物的定量、定性采集. 定量采集使用 1/16 m²彼德生采泥器采集底泥,每个调查断面随机采集 5 ~ 10 次,底泥采用 40 和 60 目分样筛进行筛选. 定性样品的采集则首先在河岸及浅水处拾取大型底栖动物,然后在河滩及浅水处用刷石法采集. 所采集大型底栖动物用 4% 甲醛溶液固定后带回实验室,再移入 75% 酒精中长期保存. 在室内进行种类鉴定、个体计数、称量(0. 0001 g 天平)和生物量计算.

1.2 水质指标测定

pH、溶解氧(DO)用便携式水质分析仪(YSI6600-02, USA)现场测定;总磷(TP)、总氮(TN)、化学需氧量(COD)用多参数水质分析仪(DR890, USA)现场测定;生物需氧量(BOD)、铵态氮(NH₄⁺-N)、亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)等指标,将水样带回实验室,采用标准分析方法监测^[14].

1.3 水质的生物学评价

根据松花江干流大型底栖动物群落的特点及取样数据,选择以下生物指数进行水质评价.

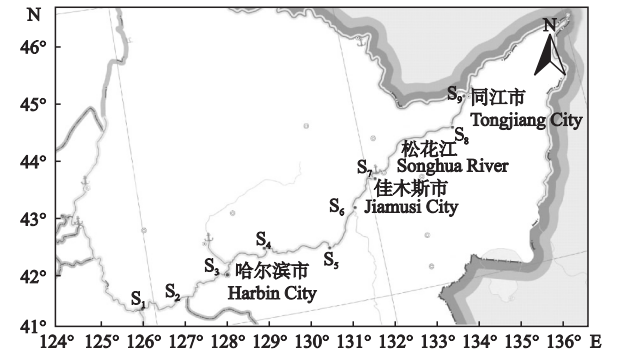


图1 松花江干流采样点的分布
Fig. 1 Distribution of sampling sites in main stream of Songhua River
S₁ ~ S₉: 采样点 Sampling sites.

1.3.1 Shannon 指数^[15] $H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$

式中： S 为总物种数； P_i 为 i 物种的个体数占总个体数的比例； n_i 为 i 物种的个体数。水质评价标准： $H' > 3$ ，清洁； $2 \sim 3$ ，轻污染； $1 \sim 2$ ，中污染； $0 \sim 1$ ，重污染。

1.3.2 BI 生物指数^[16] $BI = \sum_{i=1}^S n_i a_i / N$

式中： n_i 为第 i 分类单元（属或种）的个体数； a_i 为第 i 分类单元（属或种）的耐污值； N 为各分类单元（属或种）的个体总和； S 为种类数。水质评价标准： $BI = 0 \sim 3.50$ ，极清洁； $3.51 \sim 4.50$ ，很清洁； $4.51 \sim 5.50$ ，清洁； $5.51 \sim 6.50$ ，一般； $6.51 \sim 7.50$ ，轻度污染； $7.51 \sim 8.50$ ，污染； $8.51 \sim 10.00$ ，严重污染。

1.3.3 FBI 生物指数^[17] $FBI = \sum_{i=1}^F \frac{t_i n_i}{N}$

式中： n_i 为第 i 科的个体数； t_i 为第 i 科的耐污值； N 为各科个体总和； F 为科数。水质评价标准： $FBI = 0 \sim 3.75$ ，极清洁； $3.76 \sim 4.25$ ，很清洁； $4.26 \sim 5.00$ ，清洁； $5.01 \sim 5.75$ ，一般； $5.76 \sim 6.50$ ，轻度污染； $6.51 \sim 7.25$ ，污染； $7.26 \sim 10.00$ ，严重污染。

1.4 生物多样性指数

1.4.1 群落相似性指数 Sorensen 相似性指数^[18]： $S_s = 2c / (a + b)$ ；Jaccard 相似性指数^[19]： $S_j = c / (a + b - c)$ 。式中： a 为 S_i 站点大型底栖动物群落的物种数； b 为 S_j 站点大型底栖动物群落的物种数； c 为两个站点共有的种数。

1.4.2 群落生物多样性指数 Pielou 均匀度指数^[20]： $J = (- \sum P_i \log_2 P_i) / \log_2 S$ ；Simpson 指数^[21]： $D = 1 - \sum [n_i(n_i - 1) / N(N - 1)]$ 。式中： S 为总物种数； P_i 为 i 物种的个体数占总个体数的比例； n_i 为 i 物种的个体数； N 为所有种的个体总数。

2 结果与讨论

2.1 松花江干流大型底栖动物群落结构及动态

2.1.1 种类组成 调查共采集底栖动物 116 种，隶属于 16 目 36 科。分别隶属于昆虫纲（包括蜉蝣目、襀翅目、毛翅目、双翅目、半翅目和蜻蜓目）、腹足纲（中腹足目、基眼目和异鳃总目）、蛭纲（吻蛭目和无吻蛭目）、寡毛纲（颤蚓目和单向蚓目）、瓣鳃纲（真瓣鳃目）、甲壳纲（十足目）和瓣鳃纲（真瓣鳃目）。其中水生昆虫 74 种，分属 6 目 21 科，占总数 63.8%；软体动物 25 种，分属 4 目 8 科，占总数 21.6%；环节动物 14 种，分属 4 目 4 科，占总数 12.1%；甲壳动物 3 种，分属 2 目 2 科，占总数 2.6%。

所采集到的 116 种大型底栖动物，基本上涵盖了相关研究^[9-13]的调查种类。在大型底栖动物类群上，松花江干流以水生昆虫和软体动物为主。但就物种而言，流水性和冷水性种类较多，流水性种类如蜉蝣（*Ephemera serica*）、红斑蜉（*Ephemera rufomaculata*）、生米蜉（*Ephemera shengmi*）、萨夏林蜉（*Ephemera sachalinensis*）、龙氏红蚊蜉（*Rhoenanthus youi*）、普通仙女虫（*Nais communis*）等，冷水性种类如克拉泊水丝蚓（*Limnodrilus claparedeianus*）、钝毛水丝蚓（*Limnodrilus amblysetus*）等。

2.1.2 群落结构的时空动态 从空间上看，在一年中采样点 S_4 采集到的底栖动物种类最多，共计 53 种（图 2）。这可能与 S_4 位于库区，生境复杂，空间异质性强有关。而 S_8 的种类最少，仅有 7 种，这可能是由于该点水流较急，底质多为细沙底，生境单一，一些种类不能生存的缘故。

2.1.3 群落结构的时间动态 从时间上看，春季采集到的物种最多，为 77 种，明显高于其他两季（图 3），这说明春季江河底栖动物大量繁殖，特别是少

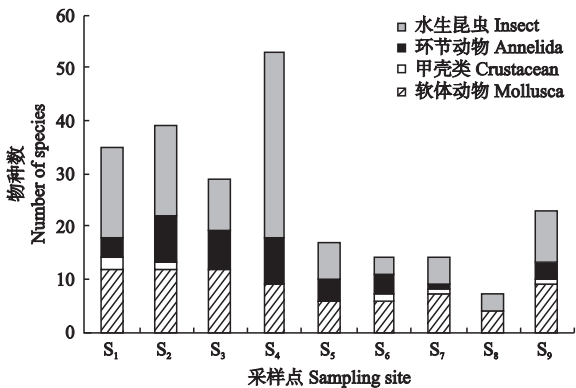


图2 松花江干流大型底栖动物群落的空间动态
Fig. 2 Spatial dynamics of macrozoobenthos community in main stream of Songhua River.

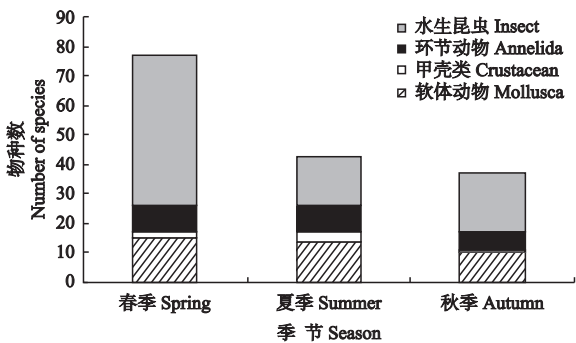


图3 松花江干流大型底栖动物群落的时间动态
Fig. 3 Temporal dynamics of macrozoobenthos community in main stream of Songhua River.

表 1 松花江干流大型底栖动物密度和生物量
Table 1 Density and biomass of macrobenthos in main stream of Songhua River

| 项目 Item | 春季 Spring | | 夏季 Summer | | 秋季 Autumnn | | 平均值 Average |
|--|----------------------|---------------|----------------------|----------------|----------------------|----------------|----------------|
| | 平均值±标准差 Mean ± SD | 变幅 Range | 平均值±标准差 Mean ± SD | 变幅 Range | 平均值±标准差 Mean ± SD | 变幅 Range | |
| 密度 Density (ind · m ⁻²) | 90. 5±127. 8 | 5. 3 ~ 353. 3 | 48. 6±40. 5 | 11. 2 ~ 142. 4 | 61. 3±48. 4 | 11. 9 ~ 134. 7 | 66. 8 |
| 生物量 Biomass (g · m ⁻²) | 14. 4±20. 4 | 0. 0 ~ 46. 8 | 23. 1±22. 9 | 0. 7 ~ 23. 1 | 35. 4±66. 0 | 0. 3 ~ 183. 3 | 24. 3 |

表 2 松花江干流大型底栖动物多样性指数
Table 2 Diversity index of macrobenthos in main stream of Songhua River

| 季节 Season | 多样性指数 Diversity index | | | | | |
|--------------|-----------------------|-------------|----------------------|-------------|----------------------|-------------|
| | H' | | D | | J | |
| | 平均值±标准差 Mean ± SD | 变幅 Range | 平均值±标准差 Mean ± SD | 变幅 Range | 平均值±标准差 Mean ± SD | 变幅 Range |
| 春季 Spring | 0. 9±0. 2 | 0. 6 ~ 1. 2 | 0. 9±0. 2 | 0. 5 ~ 1. 0 | 0. 4±0. 1 | 0. 3 ~ 0. 6 |
| 夏季 Summer | 0. 6±0. 3 | 0. 3 ~ 1. 1 | 0. 6±0. 2 | 0. 3 ~ 0. 9 | 0. 3±0. 1 | 0. 1 ~ 0. 5 |
| 秋季 Autumnn | 0. 6±0. 3 | 0. 2 ~ 1. 1 | 0. 7±0. 2 | 0. 4 ~ 1. 0 | 0. 3±0. 1 | 0. 1 ~ 0. 5 |

见种在春季出现较多. 相反,在秋季少见种出现得比较少,物种数仅有 37 种,这也与秋季捕食者的捕食压力大和部分摇蚊幼虫羽化有关.

2.1.4 密度和生物量周年动态 松花江干流大型底栖动物年平均密度为 66.8 ind · m⁻²、年平均生物量为 24.3 g · m⁻². 春、夏、秋季的平均密度以春季最高 (90.5 ind · m⁻²), 秋季 (61.3 ind · m⁻²) 次之, 夏季 (48.6 ind · m⁻²) 最低. 平均生物量以秋季最高 (35.4 g · m⁻²), 夏季 (23.1 g · m⁻²) 次之, 春季 (14.4 g · m⁻²) 最低 (表 1). 松花江干流一般于每年 4 月 20 日左右封冰期结束, 开江后水温开始升高, 大型底栖动物活动能力增强, 采集到的大型底栖动物种类数增加, 由于采集到的主要是个体较小的寡毛类和摇蚊幼虫, 所以春季生物量最低; 夏季的水温在一年中最高, 大型底栖动物活动频繁, 并经过春季的繁殖和生长, 部分摇蚊幼虫羽化, 导致其密度最低; 秋季水温开始下降, 大型底栖动物活动减弱, 部分种类开始休眠, 但软体动物所占比重较大, 生物量仍为全年最高.

各断面 3 个季节密度和生物量变化趋势大体一致, 春季 S₄、S₉ 断面密度很高而生物量较低 (图 4), 与 2 个断面采集的大型底栖动物个体数量很大而体重极小有关.

2.1.5 多样性指数 松花江干流大型底栖动物多样性指数也存在季节差异 (表 2), 多样性指数与大型底栖动物的密度和种类组成直接相关^[22]. 春季时寡毛类和摇蚊幼虫开始大量出现, Shannon 指数、Pielou 均匀度指数、Simpson 指数均以春季最高; 夏

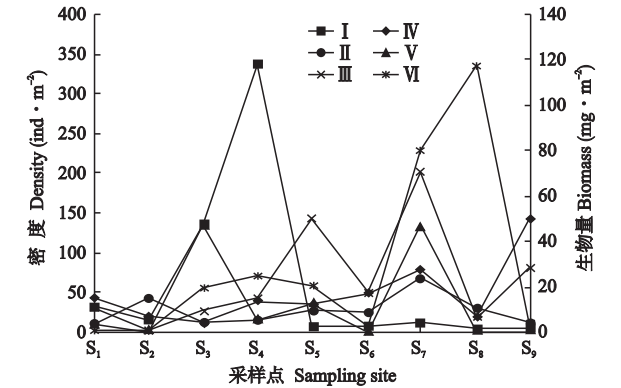


图 4 松花江干流大型底栖动物群落密度和生物量的周年动态

Fig. 4 Annual variations of density and biomass of macrozoobenthos community in main stream of Songhua River.

I: 春季密度 Spring density; II: 秋季密度 Autumn density; III: 夏季生物量 Summer biomass; IV: 夏季密度 Summer density; V: 春季生物量 Spring biomass; VI: 秋季生物量 Autumn biomass.

季大型底栖动物密度最低, 但分布相对均匀, 因此多样性指数与秋季相近.

2.2 各类型微生境群落相似性

各断面微生境的 Sorensen 和 Jaccard 相似性指数变化趋势相似 (表 3). 松花江干流各断面微生境生态环境差异较大, 共有种不多, 反映出底质对松花江干流大型底栖动物有一定影响. 松花江干流河道中部地质多为硬砂底, 多数断面含沙量高, 平均粒径小, 部分沿岸带为石质或卵石, 在江叉和河道弯曲缓流处为泥底. 营附着生活的水生昆虫幼虫和蛭类栖息于底质为石质或卵石的沿岸带, 寡毛类和部分摇蚊幼虫喜栖息于泥底. S₇ 和 S₈、S₁ 和 S₂ 的相似性

表 3 松花江干流各断面微生物的物种相似性
Table 3 Similarity of different river section composition between microhabitats in main stream of Songhua River (Sorensen/Jaccard)

| | S ₁ | S ₂ | S ₃ | S ₄ | S ₅ | S ₆ | S ₇ | S ₈ | S ₉ |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| S ₁ | 1 | | | | | | | | |
| S ₂ | 0.51/0.35 | 1 | | | | | | | |
| S ₃ | 0.34/0.21 | 0.35/0.21 | 1 | | | | | | |
| S ₄ | 0.28/0.16 | 0.29/0.17 | 0.37/0.23 | 1 | | | | | |
| S ₅ | 0.35/0.21 | 0.29/0.17 | 0.39/0.24 | 0.23/0.13 | 1 | | | | |
| S ₆ | 0.20/0.11 | 0.30/0.18 | 0.32/0.23 | 0.21/0.12 | 0.50/0.30 | 1 | | | |
| S ₇ | 0.41/0.26 | 0.30/0.18 | 0.19/0.10 | 0.09/0.05 | 0.30/0.10 | 0.43/0.27 | 1 | | |
| S ₈ | 0.19/0.11 | 0.13/0.07 | 0.22/0.13 | 0.10/0.05 | 0.30/0.20 | 0.48/0.31 | 0.60/0.40 | 1 | |
| S ₉ | 0.31/0.18 | 0.29/0.17 | 0.39/0.24 | 0.19/0.10 | 0.30/0.10 | 0.33/0.19 | 0.20/0.10 | 0.33/0.20 | 1 |

最高,Sorensen 相似性指数分别为 0.60、0.51,Jaccard 相似性指数分别为 0.40、0.35. 物种相似性不高,最大仅为 60%.

2.3 功能摄食类群分析

本文大型底栖动物功能摄食类群的划分,主要依据 Cummins^[23]、Cummins 和 Klug^[24]、Merrit 等^[25]、Wetzel^[26] 和刘健康^[27] 提出的划分规则,并参照相关研究对部分大型底栖动物功能摄食类群的划分^[27-28]. 在采集到的 116 种大型底栖动物中,共有撕食者 26 种,收集者 32 种,刮食者 28 种,捕食者 30 种,各功能摄食群种类数相近. S₄ 受水利工程影响,淹没区面积很大,河边水生维管束植物丰富,落叶、树枝或其他有机物质残渣有相当一部分没有分解,因此 S₄ 以撕食植物组织为生的撕食者比其他断面多(表 4).

S₄ 断面生活的种类,主要是一些对水中溶解氧要求不高且要求营养物质丰富或具有较高耐污性质的种类,如正颤蚓(*Tubifex tubifex*)、克拉泊水丝蚓、霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)、苏氏尾鳃蚓(*Branchiura sowerbyi*)、奥特开水丝蚓(*Limnodrilus udekemianus*)、钝毛水丝蚓、缘拟扁蛭(*Hemiclepsis marginata*)、静泽蛭(*Helobdella stagnalis*)、异面舌蛭(*Glossiphonia heteroclita*)、苍白摇蚊(*Chironomus pallidivittatus*)、冲绳摇蚊(*Chironomus okinawanus*)、羽

摇蚊(*Chironomus plumosus*) 幼虫、淡绿二叉摇蚊(*Dicrotenidipes pelochloris*)、花翅前突摇蚊(*Procladius choreus*) 等. 喜静水性螺类增加 3 种,截口土蜗(*Galba truncatula*)、小土蜗(*Galba pervia*) 和耳萝卜螺(*Radix auricularia*),而营附着生活的水生昆虫种类减少甚至消失. S₄ 断面摇蚊幼虫和寡毛类的数量和生物量在 3 个季节均为最高. 由于大顶山航电枢纽的修建,改变了相应河段的水文循环与理化性质,使底质环境趋于单一化,大型底栖动物的群落类型也趋于稳定,主要是环节动物(寡毛类)-水生昆虫(摇蚊类)型,群落的组成类群上也以摇蚊类或寡毛类占优势,但优势类群总体表现并不明显.

2.4 水化学指标

调查期间,松花江干流 S₁ ~ S₅ 水化学指标大部分时间均在中华人民共和国地表水环境质量标准^[29] II 类水标准限值内,S₄ 在个别时间为 III 类水; S₆ ~ S₉ 大部分时间为 III、IV 类水,个别时间为 II 类水(表 5). 松花江干流上游水质总体优于下游,在个别时期个别断面存在工业点污染源,全年都存在农业和生活污水的排放,并且个别断面污染较重,主要污染物为生物需氧量、生化需氧量和铵态氮.

2.5 大型底栖动物水质生物学评价

利用大型底栖动物来监测水体污染状况,评价水环境质量具有其独特的优越性,目前已被很多国

表 4 松花江干流各微生物大型底栖动物的功能摄食类群
Table 4 Functional feeding groups in various microhabitats in main stream of Songhua River

| 功能摄食类群 Functional feeding group | 采样点 Sampling site | | | | | | | | |
|------------------------------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | S ₁ | S ₂ | S ₃ | S ₄ | S ₅ | S ₆ | S ₇ | S ₈ | S ₉ |
| 撕食者 Shredder | 8 | 8 | 4 | 19 | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 |
| 收集者 Collector | 11 | 11 | 12 | 15 | 8 | 5 | 4 | 4 | 10 |
| 刮食者 Scraper | 7 | 9 | 12 | 7 | 4 | 4 | 6 | 2 | 9 |
| 捕食者 Predator | 9 | 11 | 1 | 11 | 5 | 3 | 4 | 1 | 2 |
| 总计 Total | 35 | 39 | 29 | 52 | 17 | 14 | 14 | 7 | 23 |

表 5 松花江干流主要水质指标(年平均值)
Table 5 Main water quality index in main stream of Songhua River (annual average value)

| 采样点 Sampling site | pH | 溶解氧 DO (mg · L ⁻¹) | 总磷 TP (mg · L ⁻¹) | 总氮 TN (mg · L ⁻¹) | 铵态氮 NH ₄ ⁺ -N (mg · L ⁻¹) | 亚硝酸盐氮 NO ₂ ⁻ -N (mg · L ⁻¹) | 硝态氮 NO ₃ ⁻ -N (mg · L ⁻¹) | 化学需氧量 COD (mg · L ⁻¹) | 生物需氧量 BOD (mg · L ⁻¹) |
|----------------------|-----|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|---|---|---|---|
| S ₁ | 7.5 | 9.0 | 0.1 | 1.4 | 0.2 | 0.0 | 0.2 | 14.3 | 4.0 |
| S ₂ | 7.6 | 8.8 | 0.1 | 1.7 | 0.5 | 0.0 | 0.5 | 15.6 | 4.2 |
| S ₃ | 8.1 | 8.7 | 0.1 | 1.5 | 0.4 | 0.0 | 0.4 | 16.0 | 3.3 |
| S ₄ | 8.0 | 9.3 | 0.3 | 1.6 | 1.2 | 0.0 | 1.2 | 21.8 | 6.5 |
| S ₅ | 7.6 | 8.6 | 0.1 | 2.0 | 0.5 | 0.0 | 0.5 | 18.8 | 3.8 |
| S ₆ | 7.5 | 9.1 | 0.2 | 2.3 | 0.9 | 0.0 | 0.9 | 18.5 | 4.8 |
| S ₇ | 7.3 | 7.9 | 0.1 | 3.0 | 0.8 | 0.0 | 0.8 | 21.3 | 5.1 |
| S ₈ | 7.4 | 8.2 | 0.1 | 2.2 | 0.7 | 0.0 | 0.7 | 17.5 | 4.0 |
| S ₉ | 7.5 | 7.9 | 0.1 | 2.0 | 0.4 | 0.0 | 0.4 | 17.1 | 5.1 |

表 6 松花江干流各断面的生物指数和水质评价
Table 6 Biotic indices and bioassement of water quality of different reaches in main stream of Songhua River

| 采样点 Sampling site | 季节 Season | Shannon 指数 | | | BI 生物指数 | | | FBI 生物指数 | | |
|----------------------|--------------|--------------------|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| | | 指数值 Index value | 水质级别 Water quality level | 洁净度 排序 Rank by purity degree | 指数值 Index value | 水质级别 Water quality level | 洁净度 排序 Rank by purity degree | 指数值 Index value | 水质级别 Water quality level | 洁净度 排序 Rank by purity degree |
| S ₁ | 春季 Spring | 3.9 | 清洁 | 1 | 6.6 | 轻污 | 7 | 5.7 | 一般 | 3 |
| | 夏季 Summer | 2.9 | 轻污 | 3 | 3.4 | 极清洁 | 1 | 2.8 | 极清洁 | 1 |
| | 秋季 Autumn | 3.7 | 清洁 | 1 | 3.7 | 很清洁 | 1 | 5.5 | 一般 | 4 |
| S ₂ | 春季 Spring | 2.9 | 轻污 | 3 | 5.5 | 清洁 | 2 | 5.2 | 一般 | 2 |
| | 夏季 Summer | 1.0 | 重污 | 8 | 5.1 | 清洁 | 7 | 5.0 | 一般 | 7 |
| | 秋季 Autumn | 1.1 | 中污 | 8 | 7.0 | 轻污 | 6 | 6.9 | 污染 | 6 |
| S ₃ | 春季 Spring | 3.6 | 清洁 | 2 | 6.4 | 一般 | 5 | 5.9 | 一般 | 7 |
| | 夏季 Summer | 2.2 | 轻污 | 4 | 3.9 | 很清洁 | 4 | 3.8 | 很清洁 | 3 |
| | 秋季 Autumn | 3.0 | 清洁 | 2 | 6.0 | 一般 | 5 | 5.9 | 轻污 | 5 |
| S ₄ | 春季 Spring | 2.1 | 轻污 | 9 | 8.9 | 重污 | 9 | 7.9 | 重污 | 8 |
| | 夏季 Summer | 3.6 | 清洁 | 1 | 7.1 | 轻污 | 9 | 6.8 | 污染 | 9 |
| | 秋季 Autumn | 2.1 | 轻污 | 5 | 7.6 | 污染 | 7 | 7.3 | 重污 | 8 |
| S ₅ | 春季 Spring | 2.7 | 轻污 | 5 | 5.3 | 清洁 | 1 | 5.8 | 轻污 | 6 |
| | 夏季 Summer | 1.1 | 中污 | 7 | 4.2 | 很清洁 | 5 | 4.1 | 很清洁 | 5 |
| | 秋季 Autumn | 2.4 | 中污 | 3 | 5.6 | 一般 | 4 | 5.4 | 一般 | 3 |
| S ₆ | 春季 Spring | 2.8 | 轻污 | 4 | 5.7 | 一般 | 3 | 5.7 | 一般 | 4 |
| | 夏季 Summer | 0.5 | 重污 | 9 | 3.8 | 很清洁 | 3 | 3.8 | 很清洁 | 4 |
| | 秋季 Autumn | 2.2 | 中污 | 4 | 7.7 | 污染 | 8 | 7.1 | 污染 | 7 |
| S ₇ | 春季 Spring | 2.4 | 轻污 | 6 | 6.3 | 一般 | 4 | 5.0 | 一般 | 1 |
| | 夏季 Summer | 2.0 | 中污 | 5 | 6.5 | 轻污 | 8 | 6.2 | 轻污 | 8 |
| | 秋季 Autumn | 0.8 | 重污 | 9 | 5.0 | 清洁 | 2 | 4.9 | 清洁 | 2 |
| S ₈ | 春季 Spring | 2.2 | 轻污 | 7 | 6.5 | 一般 | 6 | 5.7 | 一般 | 5 |
| | 夏季 Summer | 3.1 | 清洁 | 2 | 4.3 | 很清洁 | 6 | 4.3 | 清洁 | 6 |
| | 秋季 Autumn | 1.6 | 中污 | 7 | 5.0 | 清洁 | 3 | 4.7 | 清洁 | 1 |
| S ₉ | 春季 Spring | 2.2 | 轻污 | 8 | 8.4 | 污染 | 8 | 8.0 | 重污 | 9 |
| | 夏季 Summer | 1.7 | 中污 | 6 | 3.5 | 极清洁 | 2 | 3.4 | 极清洁 | 2 |
| | 秋季 Autumn | 2.0 | 中污 | 6 | 8.2 | 污染 | 9 | 7.5 | 重污 | 9 |

家广泛地应用于水环境监测和评价^[30]. 本研究采用 Shannon 多样性指数、BI 生物指数和 FBI 生物指数对松花江干流水质进行评价. 从表 6 可以看出, BI 生物指数和 FBI 生物指数的水质评价结果基本吻合,但在 S₁、S₂、S₉ 存在差异. 用 BI 生物指数评价 S₁ 春季水质属轻污,用 FBI 生物指数评价水质属一般;用 BI 生物指数评价 S₁ 秋季水质很清洁,用 FBI 生物指数评价水质属一般;用 BI 生物指数评价 S₂ 春、夏季水质清洁,用 FBI 生物指数评价水质属一般;用 BI 生物指数评价 S₉ 春、秋季水质污染,用 FBI 生物

指数评价水质属重污. Shannon 多样性指数的水质评价与前两者结果差异较大. 原因可能是 Shannon 多样性指数适用于各种水体的水生生物群落, 主要以生物分类单元为基础, 没有考虑各物种(类群)的耐污值, 当耐污种替代敏感种时, 物种密度高时, 对水质的评价可能比实际值高. BI 生物指数和 FBI 生物指数既考虑了水生生物本身的耐污值, 又考虑了物种的个体数, 增强了评价的可靠性. 由于 BI 生物指数采用的分类单元是属或种, 比 FBI 生物指数精确度更高^[31]. 无论采取哪种生物多样性指数, S_1 、 S_2 、 S_3 断面的水质均优于 S_6 、 S_7 、 S_9 断面. 本研究虽然与张静和于洪贤^[9]和刘录三等^[13]调查断面有所不同, 但生物学评价结果一致.

3 结 论

本次调查共采到大型底栖动物 116 种, 隶属于 16 目 36 科. 大顶子山断面大型底栖动物种类的组成和群落结构与其他断面差异较大, 说明大顶子山航电枢纽建成之后, 水域生态环境发生改变, 底栖动物原有群落结构发生变化, 优势种类演替明显. 表明大顶子山航电枢纽的修建已对大型底栖动物的物种组成、群落结构造成了较大影响.

总体来看, 由于污染与非污染因子均影响群落结构和功能, 单一的生物指数只反映了生物群落结构和功能的某个侧面, 一个特定生物学指数很难准确反映某一地区的水质状况, 因此应选择多种生物指数, 并结合种群生态学、水质理化指标来综合评价水质. 生物学评价结果显示松花江干流哈尔滨段以上水质一般, 哈尔滨段以下个别断面水质在不同时期处于污染或严重污染状态, 与水质理化指标判定结果较一致. 大顶子山段、依兰段、佳木斯段、同江段主要是春季或秋季存在点源污染和面源污染, 由高负荷的耗氧有机物的排入所导致.

参考文献

- [1] Cai X-M (蔡晓明), Ren J-C (任久长), Zong Z-X (宗志祥), *et al.* Benthic macroinvertebrate communities in Qinglong River and assessment of its water quality. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1992, **3**(4): 364–370 (in Chinese)
- [2] Wang B-X (王备新), Yang L-F (杨莲芳). A study on tolerance values of benthic macroinvertebrate taxa in eastern China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24**(12): 2769–2775 (in Chinese)
- [3] Yan L (颜玲), Zhao Y (赵颖), Han C-X (韩翠香), *et al.* Macroinvertebrate faunal diversity in Xiangshan Bay. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(6): 1551–1557 (in Chinese)
- [4] Berezina NA. Water quality estimation in the Kotorosl River Basin based on zoobenthos composition. *Water Resources*, 2000, **27**: 654–662
- [5] Moreno P, Callisto M. Benthic maroinvertebrates in the watershed of an urban reservoir in southeastern Brazil. *Hydrobiologia*, 2006, **560**: 311–321
- [6] Li P (李平). Analyzing the problem of water environment and countermeasure of pollution prevention. *Environmental Science and Management* (环境科学与管理), 2005, **30**(3): 5–8 (in Chinese)
- [7] Li X-L (李兴隆). The prevention and cure on water pollution in Songhua River Basin from Heilongjiang Province. *Northern Environment* (北方环境), 2002(3): 12–13 (in Chinese)
- [8] Chen J-H (陈家厚), Yang L (杨林), Zhou A-S (周爱申), *et al.* Contributions of non-point pollution of COD_{Mn} to rivers in Songhua River Basin in Heilongjiang Province. *Environmental Monitoring in China* (中国环境监测), 2010, **26**(6): 53–55 (in Chinese)
- [9] Zhang J (张静), Yu H-X (于洪贤). Study on zoobenthos community structure and water quality assessment in Songhua River along Harbin City. *Chinese Journal of Fisheries* (水产学杂志), 2002, **22**(2): 40–45 (in Chinese)
- [10] Ma B (马彪), Yuan D (袁冬), Cao Y (曹越). Effects by Songhua River water pollutants to the zoobenthos in Harbin Section. *Environmental Science and Management* (环境科学与管理), 2010, **35**(5): 43–45 (in Chinese)
- [11] Li Z-B (李再培), Cheng Y (程英), Lü L (吕琳). Research on construction of benthic invertebrate community and water quality in Harbin part of Songhua River. *Heilongjiang Environmental Journal* (黑龙江环境通报), 2000(2): 114–116 (in Chinese)
- [12] Ma B (马彪), Zhang Z-Y (张志宇), Guan K-Z (关克志). Effects by characteristic pollutants to the aquatic ecology in Harbin section of Songhua River. *Environmental Science and Management* (环境科学与管理), 2010, **35**(7): 25–28 (in Chinese)
- [13] Liu L-S (刘录三), Li Z-Y (李中宇), Meng W (孟伟), *et al.* The community structure of zoobenthos and bioassessment of water quality in the lower reaches of the Songhua River. *Research of Environmental Sciences* (环境科学研究), 2007, **20**(3): 81–86 (in Chinese)
- [14] General Administration of Environmental Protection of China (国家环境保护总局). Determination Methods for Examination of Water and Wastewater. 4th Ed. Bei-

- jing: China Environmental Science Press, 2002 (in Chinese)
- [15] Shannon CE, Weaver WW. The Mathematical Theory of Communication. Champaign, IL: University of Illinois Press, 1963
- [16] Hilsenhoff WL. Rapid field assessment of organic pollution with a family level biotic index. *Journal of North American Benthological Society*, 1988, **7**: 65–68
- [17] Hilsenhoff WL. An improved biotic index of organic stream pollution. *Great Lakes Entomologist*, 1987, **20**: 31–39
- [18] Kerbs CJ. Ecological Methodology. CA: Benjamin/Cummings, 1989
- [19] Ma K-P (马克平), Qian Y-Q (钱迎倩). Principles and Methodologies of Biodiversity Studies. Beijing: Science Press, 1994 (in Chinese)
- [20] Pielou EC. Ecological Diversity. New York: John Wiley, 1975
- [21] Ma K-P (马克平). The concept of biological diversity. *Biodiversity Science* (生物多样性), 1993, **1**(1): 20–22 (in Chinese)
- [22] Zhou X (周 晓), Wang T-H (王天厚), Ge Z-M (葛振鸣), *et al.* Impact of *Spartina alterniflora* invasion on the macrobenthos community of Jiuduansha's intertidal mudflat in the Yangtze River estuary. *Biodiversity Science* (生物多样性), 2006, **14**(2): 165–171 (in Chinese)
- [23] Cummins KW. Structure and function of stream ecosystems. *BioScience*, 1974, **24**: 631–641
- [24] Cummins KW, Klug MJ. Feeding ecology of stream invertebrates. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1979, **10**: 147–172
- [25] Merritt RW, Cummins KW, Hauer FR, *et al.* Trophic Relationship of Macroinvertebrates. CA: Academic Press, 1996
- [26] Wetzd RG. Limnology. 2nd Ed. Philadelphia: Saunders College Publishing, 1983
- [27] Liu J-K (刘健康). Advanced Aquatic Biology. Beijing: Science Press, 1993 (in Chinese)
- [28] Wang B-X (王备新), Yang L-F (杨莲芳), Hu B-J (胡本进), *et al.* A preliminary study on the assessment of stream ecosystem health in south of Anhui Province using Benthic-Index of Biotic Integrity. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(6): 1481–1490 (in Chinese)
- [29] General Administration of Environmental Protection of China (国家环境保护总局), General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China (国家质量监督检验检疫总局). Environmental Quality Standards for Surface Water (GB 3838–2002). Beijing: China Environmental Science Press, 2002 (in Chinese)
- [30] Zhang X-G (张新刚), Leng X-L (冷雪莲), Yu H-X (于洪贤). Comprehensive assessment and protection strategies of water environment quality in the Jingpo Lake. *Reservoir Fisheries* (水利渔业), 2007, **27**(4): 55–56 (in Chinese)
- [31] Tong X-L (童晓立), Hu H-J (胡慧建), Chen S-Y (陈思源). Evaluation on the water quality of streams Nankunshan with aquatic insects as indicator species. *Journal of South China Agricultural University* (华南农业大学学报), 1995, **16**(3): 6–10 (in Chinese)

作者简介 霍堂斌,男,1980年生,博士研究生,助理研究员.主要从事鱼类增殖与保护研究. E-mail: tbhuo@163.com

责任编辑 肖 红
