

松花江流域大型底栖动物群落结构与水质评价

陈义永^{1,2}, 高养春^{1,2}, 彭衡^{1,2}, 熊薇¹, 李世国¹, 战爱斌^{1,2*}

¹中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; ²中国科学院大学, 北京 100049

摘要:【目的】松花江流域是中国最早的工业基地之一,其水生态环境遭到严重破坏,环境保护工作面临巨大挑战。开展松花江流域水质评价及典型生物类群多样性状况调查,可为松花江流域生态系统的保护和修复提供依据。【方法】于2016年7月调查整个松花江流域近岸的大型底栖动物群落组成和测定水质理化指标,开展其水质理化特征评价和生物指数评价,并探讨底栖动物群落分布与水环境因子间的关系。【结果】理化指标评价结果显示,南源松花江水质状况最差,处于中度污染;北源松花江处于轻度污染;梧桐河水质最好,处于良好状态。松花江流域3个河段的底栖动物群落结构存在空间差异性。另外,梧桐河的物种多样性最高,北源松花江次之,南源松花江最低。溶解氧和营养元素K的浓度是驱动底栖动物群落组成发生显著性差异的主要环境因子。生物指数评价结果显示,3个河段水质均处于轻度污染状态。【结论】松花江流域水质处于轻度到中度污染状态。有机污染是松花江流域面临的主要水质环境问题,对松花江流域底栖动物群落结构产生了显著影响。因此,控制有机质的输入是维持松花江流域水生态系统平衡的重要举措之一。

关键词: 松花江; 底栖无脊椎动物; 群落结构; 有机污染; 生物指数; 水质评价

Community structure of benthic macroinvertebrates and water quality assessment in the Songhua River, China

CHEN Yiyong^{1,2}, GAO Yangchun^{1,2}, PENG Heng^{1,2}, XIONG Wei¹, LI Shiguo¹, ZHAN Aibin^{1,2*}

¹Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: 【Aim】As one of the oldest industrial bases in China, the Songhua River has been seriously damaged, and environmental protection is facing huge challenges. Therefore, it is urgent to carry out studies on water quality and the diversity of benthic macroinvertebrates. 【Method】In July 2016, the macroinvertebrate communities in the Songhua River were investigated, together with the water quality indicators and biological indices. Furthermore, the relationship between community structure and environmental factors was analyzed by redundancy analysis. 【Results】Three stream segments of the Songhua River showed different environment gradients. Based on the single factor water quality assessment, the southern Songhua River was in moderate pollution and the water in the northern Songhua River was not seriously polluted. The water quality of a tributary branch, the Wutong River had the best water quality. The geographical distribution of benthic macroinvertebrates varied greatly in the different zones. The species diversity of the Wutong River was the highest, followed by the northern Songhua River, and it was the lowest in the southern Songhua River. The redundancy analysis (RDA) showed that dissolved oxygen (DO) and potassium (K) concentrations were the leading factors driving the patterns of benthic macroinvertebrates communities. Based on two biological indices, all three stream segments in the Songhua River were slightly polluted. 【Conclusion】The water of the Songhua River had light-to-moderate pollution levels. Furthermore, organic pollution was the main environmental problem, which influenced the benthic macroinvertebrate communities. Therefore, further efforts should be made to control the input of organic pollution in order to keep acceptable water quality in the Songhua River.

Key words: Songhua River; benthic macroinvertebrates; community structure; organic pollution; biological indices; water quality assessment

收稿日期 (Received): 2018-03-09 接受日期 (Accepted): 2018-03-28

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项 (2015ZX07201-008-09)

作者简介: 陈义永, 男, 博士研究生。研究方向: 水生入侵生物分子与进化生态学。E-mail: 18766216052@163.com

* 通信作者 (Author for correspondence), E-mail: zhanabin@hotmail.com, azhan@cees.ac.cn

大型底栖动物是河流生态系统中的重要生物类群,对维持河流生态系统的结构和功能具有重要意义(段学花等,2010;赵然,2014;Kenney *et al.*,2009)。底栖动物具有分布范围广、个体较大、生命周期长、迁徙能力弱等特点,且不同种类的底栖动物对环境条件的敏感程度和适应能力差别显著(张琦等,2018;Kenney *et al.*,2009;Vanni,2002)。因此,大型底栖动物常被作为河流生态系统水质评价和环境监测的重要指示生物。近年来,越来越多的国家和地区开展了以底栖动物为指示生物的水生态学,主要通过分析底栖动物的群落结构,包括物种多样性、优势种类等,探究底栖动物对水质环境因子的响应,进而评价河流生态系统的健康状况(段学花等,2010;王备新和杨莲芳,2006;Gabriels *et al.*,2010;Menetrey *et al.*,2011)。然而,不同类型的河流生态系统中底栖动物的群落特征不同,水质环境因子对底栖动物的影响也较为复杂。因此,欲开展底栖动物群落结构与河流水质因子相关性的研究及河流生态系统的水质评价,需要针对特定流域采集特定的底栖动物样品并监测其水质环境。

松花江是我国东北地区的重要河流,流域面积约 $5.5 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。松花江有南北二源头,北源松花江发源于大兴安岭东坡和伊勒呼里山,流量占松花江的 31%;南源松花江发源于长白山天池,流量占松花江的 39%。两个源头在黑龙江、吉林二省交界的三岔河处汇合后形成松花江干流。梧桐河是松花江的重要支流之一,发源于小兴安岭南麓,河长约 237 km。松花江流域作为中国最早的工业基地之一,早期由于技术落后、产业结构不合理、资源能源利用率低等问题,其水生态环境遭到严重破坏。根据 2016 年《中国环境状况公报》(中华人民共和国环境保护部,2017),松花江流域处于轻度污染状态,主要的污染指标为化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、高锰酸钾指数和氨氮浓度。松花江具有冰封期水质恶化、排污程度高、结构性水质污染等特点,使得松花江环境保护工作面临巨大挑战(郭巾巾,2011;张静,2010;赵然,2014)。因此,亟需开展松花江流域水质评价及典型生物类群多样性状况的调查与研究,为松花江流域生态系统的保护和修复提供依据。

关于松花江流域底栖动物群落组成和水质评价的研究,目前主要集中在干流河段,尤其是北源

松花江的城市段,如哈尔滨和佳木斯等(霍堂斌等,2012;刘录三等,2007;张静和于洪贤,2009;赵然,2014)。据记载,松花江流域的底栖动物主要包括水生昆虫、软体动物、甲壳动物和环节动物四大类(李中宇等,2014;张静,2010;张静和于洪贤,2009;赵然,2014)。张静(2010)调查了松花江流域哈尔滨段的底栖动物,共采集到 60 种底栖动物,其中,水生昆虫的种类最多,软体动物和环节动物次之,甲壳动物最少。赵然(2014)在松花江干流的 9 个采样点共采集到 40 种底栖动物,其中,水生昆虫是优势类群;同时,水质评价结果显示水质处于轻度到中度污染状态,总磷浓度是研究区域内的主要环境影响因子。前人的研究尺度相对较小,仅限于松花江的部分河段,整个松花江流域的水质状况尚不明晰;另外,水质评价主要依赖理化指标或单独利用生物指数,缺少水质理化评价和生物评价的联合分析。基于以上问题,本研究调查整个松花江流域近岸的大型底栖动物群落组成和监测其水质理化指标,分别通过理化指标和生物指数对水质进行评价,并探讨底栖动物群落分布与水环境因子间的关系,以为松花江流域水生态学研究提供基础资料,也为提升松花江流域水环境质量提供参考。

1 材料与方法

1.1 采样时间和采样点的设置

根据《地表水环境质量标准》(国家环境保护总局和国家质量监督检验检疫总局,2002)和《地表水环境质量评价办法》(中华人民共和国环境保护部办公厅,2011)等河流调查规范的相关要求,并结合松花江流域的地理和水文特征,于 2016 年 7 月在松花江流域的 3 个河段,包括北源松花江(干流,SHJ)、南源松花江(干流,DSHJ)和梧桐河(支流,WTH),共设置 33 个采样点,采集水质样本及底栖动物样品。其中,北源松花江设置 18 个采样点,南源松花江设置 9 个采样点,梧桐河设置 6 个采样点(图 1)。记录每个采样点的主要生境特征,包括河床的底质类别、流速类型及周边环境状况等(扫描右侧二维码,查看详情)。



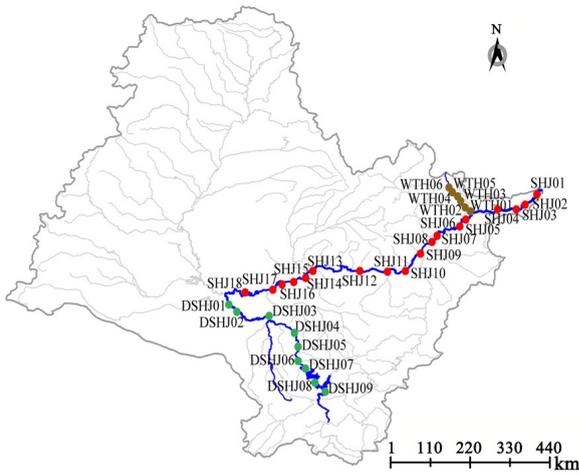


图1 松花江流域采样点分布图

Fig.1 Sampling sites along the Songhua River, China

SHJ: 北源松花江; DSHJ: 南源松花江; WTH: 梧桐河。

SHJ: Northern section of the Songhua River; DSHJ: Southern section of the Songhua River; WTH: Wutong River.

1.2 水质理化指标评价

本研究共测定了 24 个水质理化指标。其中, 现场测定的指标包括叶绿素 a (Chl_a) 浓度、电导率 (EC)、总溶解性固体 (TDS) 浓度、pH、氧化还原电位 (ORP)、溶解氧 (DO) 浓度和水温 (T); 实验室测定的指标包括总氮 (TN) 浓度、硝酸盐氮 (NO₃-N) 浓度、氨氮 (NH₄-N) 浓度、总磷 (TP) 浓度、活性磷 (SRP) 浓度、COD 及营养元素 (K、Ca、Na 和 Mg) 和重金属元素 (Cr、Mn、Fe、Cu、Zn、Pb 和 As) 浓度。参照《地表水环境质量标准》(国家环境保护总局和国家质量监督检验检疫总局, 2002), 运用单因子水质评价法对河流的水质等级进行评价, 并确定河流的主要污染指标。单因子水质评价法是以 NH₄-N 浓度、COD、TP 浓度、TN 浓度和高锰酸钾指数等指标作为评价因子, 采用断面水质类别比例法, 即根据评价河流的各水质类别的断面数占河流所有评价断面总数的百分比来评价其水质状况。

1.3 底栖动物样品的采集和物种鉴定

参照《生物多样性观测技术导则 淡水底栖大型无脊椎动物》(中华人民共和国环境保护部, 2014) 的方法和要求, 并结合松花江流域的实际水文特征, 在 33 个采样点的河岸浅水区使用抄网 (40 目网径的 D 形手网) 和徒手 2 种方法采集底栖动物样品。将采集获得的底栖动物在现场用 90%~95% 乙醇固定保存。

参考河流底栖动物相关的工具书和文献资料, 整理得到松花江流域常见的底栖动物名录 (段学花等, 2010; 霍堂斌等, 2012; 刘录三等, 2007; 张静和于洪贤, 2009; 赵然, 2014)。然后利用解剖镜或显微镜对所有采样点的底栖动物个体进行初步的形态鉴定和统计。由于传统形态学鉴定的局限性及鉴定人员水平的差异, 大部分底栖动物只能鉴定到科或属的分类单元, 很难鉴定到种。对于难以鉴定的底栖动物幼体或近缘物种, 利用 DNA 条形码技术 (DNA barcoding) 进行鉴定和确认。具体方法: 利用 DNA 提取试剂盒 DNeasy Blood and Tissue Kit (Qiagen Canada Inc., ON, Canada) 提取样品的基因组 DNA; 然后利用无脊椎动物的线粒体 COI 基因序列的通用引物 jgLCO1490 和 jgHCO2198 进行 PCR 扩增, 引物序列、PCR 的体系和程序参照 Geller *et al.* (2013)。将扩增产物送北京睿博兴科生物技术有限公司进行测序, 将得到的序列在 NCBI (美国国立生物技术信息中心) GenBank 中进行 BLAST 比对, 进而得到物种信息。

1.4 水质生物指数评价

结合松花江流域的水质理化特征和底栖动物的群落组成特点, 选取 ASPT (average score per taxon) 指数和生物学污染指数 (biology pollution index, BPI) 进行松花江水质评价。

1.4.1 ASPT 指数 ASPT 指数是在 BMWP 指数 (biological monitoring working party score system) 基础上得到的。BMWP 指数是根据物种的敏感值来反映水体环境的清洁程度, 通过累加采样点出现各指示生物的分值进行水质评价 (冷龙龙等, 2016; 赵然, 2014)。赵然 (2014) 结合松花江流域特定的生境类型和底栖动物的群落组成, 对 BMWP 记分系统进行了修正。本研究利用修正后的松花江大型底栖动物类群记分表和 BMWP 分值评价标准表 (赵然, 2014), 对松花江流域水质进行评价。

1.4.2 BPI 通过对主要的耐污种和敏感种的个体数目进行统计和转换, 得到 BPI 而进行水质评价 (李中宇等, 2014; 尤平和任辉, 2001)。其中, 水质评价等级分为 5 个: BPI < 0.1 表示清洁; 0.1 ≤ BPI < 0.5 表示轻度污染; 0.5 ≤ BPI ≤ 5 表示中度污染; BPI > 5 表示重污染; 无生物存在则表示严重污染。

1.5 数据分析

1.5.1 水质环境梯度分析 先利用 SPSS 18.0 软件中非参数 Mann-Whitney U 检验对所有采样点的水质因子差异性进行统计检验。然后利用 PRIMER 5.0 软件 (Clarke & Gorley, 2006), 采用非度量多维尺度 (non-metric multidimensional scaling ordination, NMDS) 对采样点的水质因子进行排序分析, 此分析是基于采样点间水质理化因子的欧氏距离。水质因子分析之前, 除 pH 外其他的水质理化参数均需要经过 $\log_{10}(x+1)$ 转换以消除量纲影响, 同时增加数据正态性。

1.5.2 底栖动物群落组成分析 利用 PRIMER 5.0 软件 (Clarke & Gorley, 2006) 的 DIVERSE 程序计算每个样点底栖动物群落的 α -多样性指数, 包括物种丰度 (total species, S)、生物丰度 (total individuals, N)、Margalef 丰富度 (d)、均匀度 (Pielou's evenness, J)、香农指数 (Shannon-Wiener diversity, H) 和 Simpson 生物指数 (D)。通过计算物种优势度来识别松花江流域 3 个河段中的优势底栖动物种类 (Xiong *et al.*, 2016)。

1.5.3 底栖动物群落分布与水质因子关联分析 采用冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 解析底栖动物群落结构与水质因子的关系。RDA 是在软件 CANOCO 4.5 中完成 (Lepš & Šmilauer, 2003), 以群落物种组成数据为响应变量, 以水质理化因子数据为解释变量进行回归分析。在 RDA 之前, 需要检验环境变量的共线性, 去除共线性强 (方差膨胀因子 $VIF > 20$) 的环境变量。另外, 在 RDA 过程中, 采用前向选择 (forward selection) 对影响群落空间分布的显著性水质因子进行解析。

2 结果与分析

2.1 松花江流域水质理化指标评价结果

分析结果显示, 松花江流域的北源松花江、南源松花江和支流梧桐河 3 个河段水质环境具有显著差异。不同区域间 24 个水质因子的非参数 Mann-Whitney U 检验结果显示, 15 个水质理化因子至少在两组间差异显著 ($p < 0.05$, 表 1)。利用这 15 个差异显著的水质理化因子进行 NMDS 分析表明, 3 个河段聚为不同的簇, 其中梧桐河与北源松花江、南源松花江显著分开 (图 2)。以上结果均表明, 松花江流域不同河段的水质具有显著的环境梯度。

表 1 区域之间环境变量的 Mann-Whitney U 检验

Table 1 Results of Mann-Whitney U test based on environmental variations between the study regions of the Songhua River, China

采样点 Sampling site	p 值 p value											
	Chl_a	EC	TDS	pH	ORP	DO	T	TN	TP	NO ₃ -N	COD	NH ₄ -N
SHJ-DSHJ	0.05	0.50	0.54	0.07	0.01	0.54	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00
SHJ-WTH	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.44	0.42
DSHJ-WTH	0.03	0.00	0.00	0.41	0.00	0.10	0.95	0.00	0.56	0.00	0.10	0.01
采样点 Sampling site	p 值 p value											
	SRP	K	Ca	Na	Mg	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	As	Pb
SHJ-DSHJ	0.00	0.04	0.41	0.02	0.96	0.92	0.00	0.80	0.03	0.01	0.11	0.68
SHJ-WTH	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.08	0.01	0.21	0.32	0.08	0.42	0.02
DSHJ-WTH	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.24	0.91	0.13	0.81	0.81	0.72	0.08

SHJ: 北源松花江; DSHJ: 南源松花江; WTH: 梧桐河。

SHJ: Northern section of the Songhua River; DSHJ: Southern section of the Songhua River; WTH: Wutong River.

单因子水质评价法测定结果表明, 南源松花江水质状况最差, 处于中度污染; 北源松花江处于轻度污染; 梧桐河水质最好, 处于良好状态。其中, 北源松花江的 18 个样点中, 11 个样点 (61.11%) 满足 I-III 类水质标准, 4 个样点 (22.22%) 处于 V 类和劣 V 类水质标准, 主要的污染指标是 COD 和 NH₄-N 浓度; 南源松花江 9 个样点中, 4 个样点 (44.44%) 满

足 I-III 类水质标准, 2 个样点 (22.22%) 处于劣 V 类水质标准, 主要的污染指标是 COD 及 Cu 和 NH₄-N 浓度; 梧桐河的 6 个样点中, 5 个样点 (83.33%) 满足 I-III 类水质标准, 没有 V 类和劣 V 类水质 (表 2)。整体而言, 松花江流域主要的污染指标是 COD 和 NH₄-N 浓度, 说明有机污染是松花江流域面临的主要环境问题。

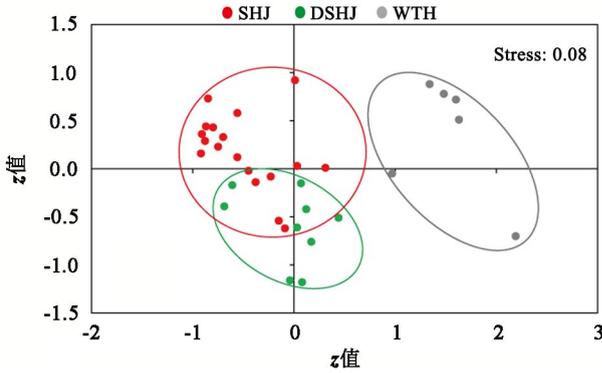


图 2 基于环境变量欧氏距离的 NMDS 分析

Fig.2 Results of non-metric multi-dimensional scaling ordination (NMDS) based on the Euclidean distance of environmental variables at each sampling site (Stress=0.08)

SHJ:北源松花江;DSHJ:南源松花江;WTH:梧桐河。

SHJ: Northern section of the Songhua River; DSHJ: Southern section of the Songhua River; WTH: Wutong River.

2.2 底栖动物群落组成

结合形态学和分子生物学方法,共鉴定得到 18 个底栖动物分类单元 606 个底栖动物个体(图 3),其中包括水生昆虫 5 种、软体动物 8 种、甲壳动物 3 种、环节动物 2 种。另外,3 个河段共有的底栖动物有 5 种,约占 27.8%;不同河段两两之间共有的种类差异较大,北源松花江和南源松花江共有种类最多(9 种),而南源松花江和梧桐河的共有种类最少(5 种)(图 4)。对底栖动物群落 α -多样性指数统计结果表明,梧桐河的物种多样性最高,北源松花江次之,南源松花江最低(表 3)。

表 2 单因子水质评价及主要污染指标

Table 2 Water quality evaluation by single factor and main pollution indicators

采样点 Sampling site	水质类别 Water quality classification	污染指标 Pollution indicator	采样点 Sampling site	水质类别 Water quality classification	污染指标 Pollution indicator	采样点 Sampling site	水质类别 Water quality classification	污染指标 Pollution indicator
SHJ01	IV	COD	SHJ12	III	NH ₄ -N	DSHJ05	III	COD
SHJ02	IV	COD	SHJ13	V	NH ₄ -N	DSHJ06	II	Cu
SHJ03	V	COD	SHJ14	II	NH ₄ -N	DSHJ07	IV	NH ₄ -N
SHJ04	IV	COD	SHJ15	III	NH ₄ -N	DSHJ08	IV	COD
SHJ05	V	COD	SHJ16	II	NH ₄ -N	DSHJ09	劣 V	COD
SHJ06	II	NH ₄ -N	SHJ17	III	NH ₄ -N	WTH01	III	COD
SHJ07	III	NH ₄ -N	SHJ18	III	NH ₄ -N	WTH02	III	COD
SHJ08	III	NH ₄ -N	DSHJ01	III	COD	WTH03	II	NH ₄ -N
SHJ09	III	NH ₄ -N	DSHJ02	IV	COD	WTH04	IV	COD
SHJ10	II	NH ₄ -N	DSHJ03	II	Cu	WTH05	III	NH ₄ -N
SHJ11	劣 V	NH ₄ -N	DSHJ04	劣 V	COD	WTH06	III	NH ₄ -N

SHJ:北源松花江;DSHJ:南源松花江;WTH:梧桐河。

SHJ: Northern section of the Songhua River; DSHJ: Southern section of the Songhua River; WTH: Wutong River.

底栖动物优势种在松花江流域具有不同的地理分布。北源松花江有 5 种优势物种,分别为 1 种水生昆虫(箭蜓属 *Gomphus* sp.)和 4 种软体动物(圆顶珠蚌 *Nodularia douglasiae*、萝卜螺属 *Radix* sp.、黑龙江短沟蜷 *Semisulcospira amurensis*、东北田螺 *Viviparus chui*);南源松花江共有 4 种优势底栖动物,包括水生昆虫(箭蜓属)、软体动物(萝卜螺属)、甲壳动物(中华小长臂虾 *Palaemonetes sinensis*)和环节动物(石蛭 *Erpobdella japonica*)各 1 种;梧桐河有 3 种优势底栖动物,分别为 1 种水生昆虫(箭蜓属)和 2 种软体动物(黑龙江短沟蜷和东北田螺)。其中,箭蜓属是 3 个河段共有的优势底栖动物;中华小长臂虾和石蛭是南源松花江所特有的优势种(表 4)。

2.3 水质生物指数评价结果

利用 2 种生物指数对松花江流域 3 个河段水质进行生物评价,结果显示 3 个河段水质均处于轻度污染状态。其中,北源松花江、南源松花江和梧桐河 3 个河段的 ASPT 指数差别不大,分别为 5.86、5.55 和 5.89;但 BPI 存在一定的差异,梧桐河的 BPI (0.19)明显低于其他 2 个河段(0.33 和 0.38),这可能是由于北源松花江和南源松花江中耐受污染的底栖动物种类和数目相对较多。优势种的统计结果(表 4)也证实了这一点,如北源松花江和南源松花江都出现了污染水体的指示物种石蛭。总体来看,梧桐河的水质状况最好,北源松花江次之,南源松花江水质最差。

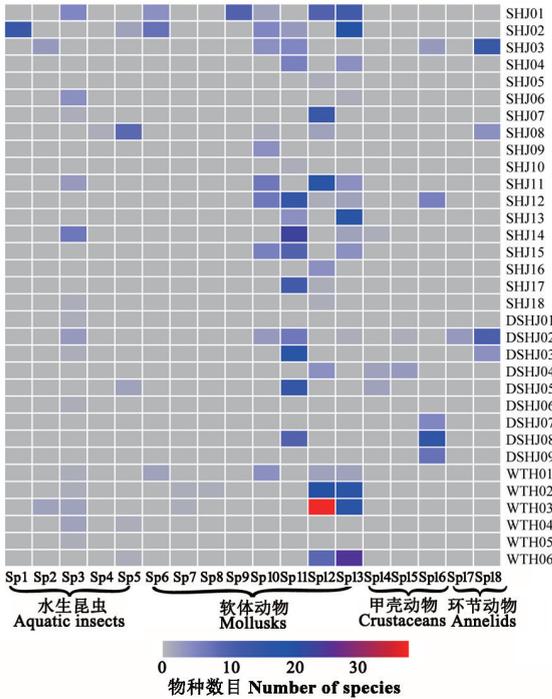


图 3 基于 33 个样点大型底栖无脊椎动物丰度的热图
 Fig.3 Heat map showing the abundance of benthic macroinvertebrates at 33 sampling sites along the Songhua River, China
 SHJ:北源松花江;DSHJ:南源松花江;WTH:梧桐河。
 Sp 表示底栖动物种类。

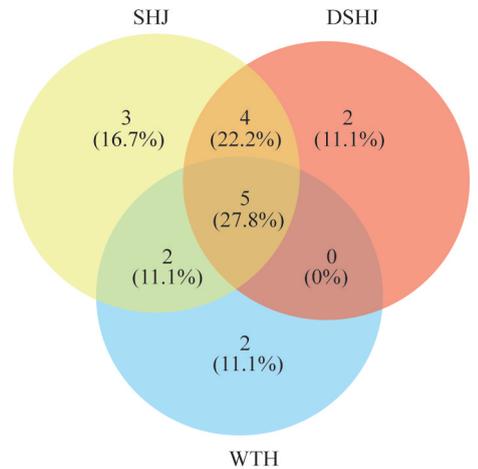


图 4 松花江流域 3 个河段底栖动物种类分布韦恩图
 Fig.4 Distribution (Venn diagram) of benthic macroinvertebrate species in three segments of the Songhua River, China

SHJ:北源松花江;DSHJ:南源松花江;WTH:梧桐河。括号外的数字代表鉴定的底栖动物数目,百分比数代表占总底栖动物数目的比例。

SHJ: Northern section of the Songhua River; DSHJ: Southern section of the Songhua River; WTH: Wutong River. The numbers outside brackets indicate the number of benthic macroinvertebrate species detected, while the percentage describes the proportion of species in the recorded 18 species from all sampling sites.

表 3 松花江流域 3 个河段底栖动物群落物种多样性指数

Table 3 Biodiversity indices of the benthic macroinvertebrate communities in the Songhua River, China

采样点 Sampling site	物种丰度 Total species (S)	生物丰度 Total individuals (N)	Margalef 丰富度 Margalef richness (d)	Pielou's 均匀度 Pielou's evenness (J)	香农指数 Shannon-Wiener diversity (H)	Simposon 生物指数 Simposon biological index (D)
SHJ	3.00	18.50	0.69	0.60	0.72	0.44
DSHJ	2.44	13.33	0.48	0.44	0.52	0.31
WTH	3.50	25.50	0.86	0.61	0.79	0.50

SHJ:北源松花江;DSHJ:南源松花江;WTH:梧桐河。

SHJ: Northern section of the Songhua River; DSHJ: Southern section of the Songhua River; WTH: Wutong River.

表 4 松花江流域 3 个河段底栖动物优势种统计表

Table 4 Summary of the dominant species of three segments in the Songhua River, China

物种 Species	优势度 Relative abundance			物种 Species	优势度 Relative abundance			物种 Species	优势度 Relative abundance		
	SHJ	DSHJ	WTH		SHJ	DSHJ	WTH		SHJ	DSHJ	WTH
纹石蛾 <i>Cheumatopsyche brevilineata</i>	0.00	0.00	0.00	乌苏里圆田螺 <i>Cipangopaludina ussuriensis</i>	0.00	0.00	0.00	东北田螺 <i>Viiparus chui</i>	0.10	0.00	0.27
摇蚊科 Chironomidae	0.00	0.00	0.00	闪蛴 <i>Corbicula nitens</i>	0.00	0.00	0.00	钩虾 <i>Gammarus salinus</i>	0.00	0.01	0.00
箭蜒属 <i>Gomphus</i> sp.	0.02	0.02	0.04	三角帆蚌 <i>Hyriopsis cumingii</i>	0.00	0.00	0.00	多齿新米虾 <i>Neocaridina denticulate</i>	0.00	0.01	0.00
红螳螂 <i>Labidura riparia</i>	0.00	0.00	0.00	圆顶珠蚌 <i>Nodularia douglasiae</i>	0.05	0.00	0.00	中华小长臂虾 <i>Palaemonetes sinensis</i>	0.00	0.08	0.00
黄河花蜉 <i>Potamanthus luteus</i>	0.00	0.00	0.00	萝卜螺属 <i>Radix</i> sp.	0.12	0.18	0.00	宽身白舌蛭 <i>Alboglossiphonia lata</i>	0.00	0.00	0.00
中国圆田螺 <i>Cipangopaludina chinensis</i>	0.00	0.00	0.00	黑龙江短沟蜷 <i>Semisulcospira amurensis</i>	0.08	0.00	0.31	石蛭 <i>Erpobdella japonica</i>	0.01	0.03	0.00

SHJ:北源松花江;DSHJ:南源松花江;WTH:梧桐河。加粗的数值表示底栖动物在此河段为优势种(优势度>0.02)。

SHJ: Northern section of the Songhua River; DSHJ: Southern section of the Songhua River; WTH: Wutong River. The bold values indicated dominant species (the dominance index was over 0.02).

2.4 底栖动物群落分布与水环境因子的相关性

对 24 个水环境因子进行共线性检验, 去除共线性大的 10 个因子, 将剩余的 14 个因子进行前向选择。RDA 结果显示, DO 和 K 浓度与底栖动物群落空间分布显著关联 ($P < 0.05$), 其中, 校正 $R^2 (R_{adj}^2)$ 为 0.49。基于这 2 个水质环境变量构建节俭型 RDA 模型, 分别得到环境变量与样点的双序图 (图 5A) 和环境变量与物种的双序图 (图 5B)。图 5A 显示, 梧桐河样点成簇分布, 单独聚在一起, 都分布在第四象限; 南源松花江的样点主要分布在第二象限; 而北源松花江的样点在 4 个象限均有分布。DO 浓度主要与第一轴相关, 其中, 梧桐河大部分样点的 DO 浓度较高, 而南源松花江和北源松花江大部分采样点的 DO 浓度较低。营养元素 K 浓

度与第二轴的相关性更大。沿着 K 的浓度梯度, 南源松花江样点与梧桐河样点显著分开, 即 K 浓度是导致南源松花江河段与梧桐河河段底栖动物群落组成发生显著差异的主要驱动因子。由图 5B 可知, 大部分清洁水体的指示动物 (如 2 种水生昆虫箭蜓属和黄河花蜉 *Potamanthus luteus*) 分布在第四象限, 与 DO 浓度有较强的正相关关系, 与 K 浓度呈现较强的负相关关系。而软体动物萝卜螺属以及甲壳动物钩虾 *Gammarus salinus*、多齿新米虾 *Neocaridina denticulata* 和中华小长臂虾是常见的污染水质的指示生物, 位于第一、二象限, 与水体中的 K 浓度呈现较强的正相关关系, 说明这些底栖动物受 K 浓度的影响较大, 适合在较高的 K 浓度中生存。

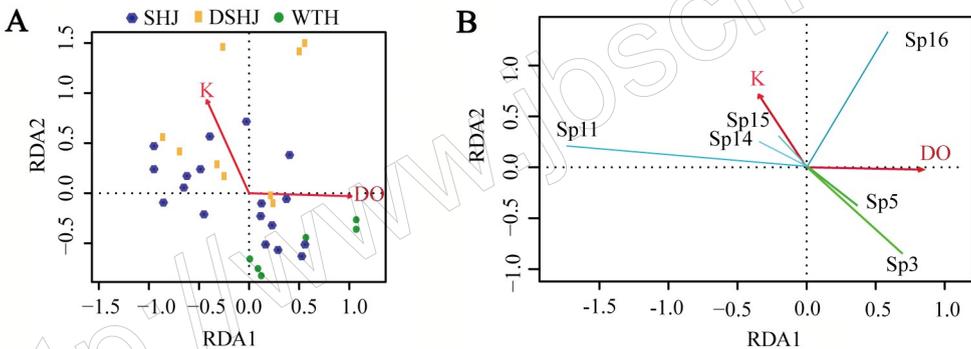


图 5 基于冗余分析 (RDA) 的样点—环境变量双序图 (A) 和物种—环境变量双序图 (B)
Fig.5 Biplots of sampling sites and environmental factors (A) and benthic macroinvertebrates and environmental factors (B) based on RDA ordination

SHJ: 北源松花江; DSHJ: 南源松花江; WTH: 梧桐河。Sp3: 箭蜓属; Sp5: 黄河花蜉;
Sp11: 萝卜螺属; Sp14: 钩虾; Sp15: 多齿新米虾; Sp16: 中华小长臂虾。

SHJ: Northern section of the Songhua River; DSHJ: Southern section of the Songhua River; WTH: Wutong River. Sp3: *Gomphus* sp.;
Sp5: *Potamanthus luteus*; Sp11: *Radix* sp.; Sp14: *Gammarus salinus*; Sp15: *Neocaridina denticulata*; Sp16: *Palaemonetes sinensis*.

3 讨论

3.1 松花江流域底栖动物的群落结构特征及其影响因素

本次调查共获得松花江流域大型底栖动物 18 种, 其中, 水生昆虫 5 种, 软体动物 8 种, 甲壳动物 3 种, 环节动物 2 种。赵然 (2014) 于 2012 年采集松花江干流肇源断面到同江断面的底栖动物共 40 种, 包括水生昆虫 30 种、软体动物 5 种、甲壳动物 2 种以及环节动物 3 种。本研究中水生昆虫的种类与赵然 (2014) 的研究存在较大差异, 这可能由不同采样方法所导致: 本研究采样利用抄网和徒手 2 种定性采样的方法; 而赵然 (2014) 采样结合了定性和

定量的方法。相比于软体动物和甲壳动物, 大部分水生昆虫个体较小, 更容易漂流或受人为操作的影响, 因此, 利用定性采样得到的水生昆虫的数目和种类相对较少。但是, 定性采样具有省时、省力、相对容易操作等优点, 适用于河流的岸边、水草等生境 (王备新和杨莲芳, 2006; 杨柳等, 2013); 同时, 定量采样多用于底栖生态学的研究, 而定性采样主要用于利用底栖动物进行水质生物评价的研究中 (王备新和杨莲芳, 2006)。

松花江流域 3 个河段的底栖动物群落结构具有显著的空间差异。首先, 不同河段的底栖动物的种类和数目不同。梧桐河具有最高的物种多样性,

北源松花江次之,南源松花江物种多样性最低。其次,不同河段两两之间共有的底栖动物种类差异较大,北源松花江和南源松花江共有种类最多,而南源松花江和梧桐河的共有种类最少。再次,3个河段优势种的组成不同,只有箭蜓属一种共有的优势底栖动物。研究表明,河流生态系统中底栖动物群落结构受到许多因素的影响,如水体的理化性质、河流的底质类型、流域土地的利用方式等(段学花等,2010;张琦等,2018)。

Kitagawa (1978) 和韩洁等(2001) 研究发现,DO水平会对河流底栖动物群落结构产生重要影响;刘俊(2006)指出,重金属污染使得湘江流域水体中软体动物的种类和数目急剧下降,从而导致底栖动物群落结构发生显著变化。本研究中北源松花江、南源松花江和梧桐河3个河段的水质理化指标差异显著,主要的污染指标是COD和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度。《2016年中国环境状况公报》(中华人民共和国环境保护部,2017)指出,有机污染是松花江面临的主要环境问题。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度和COD均是反映水体有机污染的重要指标。有机物浓度过高会导致底栖动物中敏感种和好氧生物逐渐减少,耐污种逐渐成为优势种群,最终导致底栖动物群落结构发生变化(陈其羽等,1980;迟国梁等,2010;张琦等,2018);同时,微生物对有机物分解的过程中会消耗大量的溶解氧,从而导致水体严重缺氧(韩洁等,2001;刘玉萍等,2006;张琦等,2018)。此外,本研究中RDA结果显示,DO和K浓度是驱动松花江流域底栖动物群落结构变化的关键水环境因子。其中,梧桐河大部分样点的DO浓度较高,而南源松花江和北源松花江大部分采样点的DO浓度较低;同时,大部分清洁水体的指示动物与K浓度呈现较强的负相关关系,这可能与河流周围的土地利用类型及人类活动的干扰有关。南源松花江和北源松花江河段周围的农田较多,主要大规模种植玉米和水稻,施肥对河段的影响较大;而梧桐河流域的土地利用方式主要以林场为主,人类活动对河流的干扰较小,水质状况良好,底栖动物物种多样性较高。因此,控制有机质的输入是维持松花江流域生态平衡的重要举措之一。

国内外研究表明,卵石底质的河流中底栖动物

物种多样性和丰度高于砾石和泥沙底质(陈博等,2014;段学花等,2010;赵娜,2015;Beauger *et al.*, 2006)。本研究中,北源松花江和南源松花江底质类型以泥沙和砾石为主,其底栖动物的物种多样性较低;而梧桐河底质以附生水草的卵石底质为主,其物种多样性较高。这说明河流底质也是影响底栖动物群落结构的重要因素。

3.2 松花江流域水质评价

利用水质理化因子和生物指数2种方法对松花江流域水质进行评价,其结果既存在相似性又存在一定差异。对于北源松花江而言,2种方法结果一致,均显示水质处于轻度污染状态;对于南源松花江而言,理化因子评价结果为中度污染,而生物指数的评价结果为轻度污染;梧桐河的理化因子评价结果为良好状态,而生物指数评价结果为轻度污染。造成这2种评价结果的差异主要是由于评价方式和评价内容不同。水质理化因子评价是采用单因子水质评价法,以水质因子中污染程度最重、浓度最高的因子为评价标准划分水质类别,评价结果较为严格,但同时存在一定的局限性:一方面,某些采样点的某一污染物浓度过高会对河流整体的水质评价产生影响;另一方面,未综合考虑水体中的生物等其他指标的影响,导致评价可能不够全面(顾晓昀等,2017;周笑白等,2014;左其亭等,2017)。生物指数评价法是基于底栖动物对污染因子的耐污能力构建的评价方法,能够较好地水质因子与底栖动物群落相结合,可以简便、直观地反映河流整体的水质污染状况(耿世伟等,2012;黄旭蕾等,2015;王备新和杨莲芳,2006;Li *et al.*, 2010)。因此,河流的水质评价需要在水质理化指标评价的基础上,与生物指数评价相结合,才能更全面地体现流域水生态环境状况。本研究综合水质理化指标评价和生物指数评价结果显示,松花江流域水质处于轻度到中度污染状态。此外,利用2种生物指数ASPT和BPI对松花江流域3个河段水质进行评价,得到的结果吻合,说明此次选取的生物指数具有可靠性;同时证实了赵然(2014)修正后的BMWP记分系统和评价标准较为可靠,可用于后期的相关研究。

参考文献

- 陈博, 李卫明, 陈求稳, 刘德富, 2014. 夏季漓江不同底质类型和沉水植物对底栖动物分布的影响. 环境科学学报, 34(7): 1758-1765.
- 陈其羽, 梁彦龄, 吴天惠, 1980. 武汉东湖底栖动物群落结构和动态的研究. 水生生物学集刊, 7(1): 41-56.
- 迟国梁, 赵颖, 官昭瑛, 王建武, 童晓亮, 2010. 广东横石水河大型底栖动物群落与环境因子的关系. 生态学报, 30(11): 2836-2845.
- 段学花, 王兆印, 徐梦珍, 2010. 底栖动物与河流生态评价. 北京: 清华大学出版社.
- 耿世伟, 渠晓东, 张远, 林坤德, 2012. 大型底栖动物生物评价指数比较与应用. 环境科学, 33(7): 2281-2287.
- 顾晓响, 徐宗学, 王汨, 殷旭旺, 刘麟菲, 张欣, 左德鹏, 2017. 北运河水系底栖动物群落结构与水环境质量评价. 湖泊科学, 29(6): 1444-1454.
- 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局, 2002. 地表水环境质量标准: GB 3838-2002. 北京: 中国环境科学出版社.
- 郭巾巾, 2011. 影响松花江流域水生态系统特征的主要约束因子及其空间特性研究. 硕士学位论文. 天津: 南开大学.
- 韩洁, 张志南, 于子山, 2001. 渤海大型底栖动物丰度和生物量的研究. 青岛海洋大学学报, 31(6): 889-896.
- 黄旭蕾, 李天宏, 蒋晓辉, 2015. 基于大型底栖无脊椎动物指数的黄河水质评价研究. 北京大学学报(自然科学版), 51(3): 553-561.
- 霍堂斌, 刘曼红, 姜作发, 李喆, 马波, 于洪贤, 2012. 松花江干流大型底栖动物群落结构与水质生物评价. 应用生态学报, 23(1): 247-254.
- 冷龙, 渠晓东, 张海洋, 刘晓波, 张敏, 李天科, 李伟, 2016. 不同大型底栖动物快速生物评价指数对河流水质指示比较. 环境科学研究, 29(6): 819-828.
- 李中宇, 胡显安, 刘录三, 2014. 松花江下游底栖动物组成及其环境指示作用. 中国环境监测, 30(1): 86-92.
- 刘俊, 2006. 湘江软体动物多样性研究. 博士学位论文. 长沙: 湖南师范大学.
- 刘录三, 李中宇, 孟伟, 郑丙辉, 胡显安, 2007. 松花江下游底栖动物群落结构与水质生物学评价. 环境科学研究, 20(3): 81-86.
- 刘玉萍, 王丽红, 刘薇, 刘侨博, 2006. 松花江有机污染物的污染特征研究. 环境科学与管理, 31(3): 73-75.
- 王备新, 杨莲芳, 2006. 溪流底栖动物定量与半定量采样法比较研究. 应用与环境生物学报, 12(5): 719-721.
- 杨柳, 汪祖茂, 吴忠诚, 韩瑜, 王立硕, 吴秋燕, 2013. 大型底栖动物定量和定性采样方法的对比分析. 安徽农业科学, 41(24): 10002-10004.
- 尤平, 任辉, 2001. 底栖动物及其在水质评价和监测上的应用. 淮北煤师院学报(自然科学版), 22(4): 44-48.
- 张静, 2010. 松花江哈尔滨段大型底栖动物群落结构及水质生物学评价研究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 东北林业大学.
- 张静, 于洪贤, 2009. 松花江哈尔滨段春季底栖动物群落结构研究及水质评价. 水产学杂志, 22(2): 40-45.
- 张琦, 王方鸣, 罗岳平, 黄钟霆, 黄河仙, 胡树林, 陈贝贝, 刘应迪, 2018. 湘江流域大型底栖无脊椎动物群落结构及其与环境因子的关系. 水生态学杂志. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1785.X.20180118.1749.020.html>.
- 赵娜, 2015. 河床演变对底栖动物群落的影响研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学.
- 赵然, 2014. 松花江大型底栖无脊椎动物种群分布与水质相关性分析. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学.
- 中华人民共和国环境保护部, 2014. 生物多样性观测技术导则 淡水底栖大型无脊椎动物. 北京: 中国环境科学出版社.
- 中华人民共和国环境保护部, 2017. 2016年中国环境状况公报. 环境保护, 45(11): 35-47.
- 中华人民共和国环境保护部办公厅, 2011. 地表水环境质量评价办法(试行). 北京: 中国环境科学出版社.
- 周笑白, 张宁红, 张咏, 牛志春, 刘雷, 于红霞, 2014. 太湖水质与水生生物健康的关联性初探. 环境科学, 35(1): 271-278.
- 左其亭, 陈豪, 张永勇, 窦明, 刘静, 2017. 淮河中上游轮虫群落结构分析及水质评价. 环境工程学报, 11(1): 165-173.
- BEAUGER A, LAIR N, REYES-MARCHANT P, PEIRY J L, 2006. The distribution of macroinvertebrate assemblages in a reach of the River Allier (France), in relation to riverbed characteristics. *Hydrobiologia*, 571(1): 63-76.
- CLARKE K R, GORLEY R N, 2006. *PRIMER v6: user manual/tutorial*. Plymouth, UK: PRIMER-E.
- GABRIELS W, LOCK K, PAUW N D, GOETHALS P L, 2010. Multimetric Macroinvertebrate Index Flanders (MMIF) for biological assessment of rivers and lakes in Flanders (Belgium). *Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters*, 40(3): 199-207.
- GELLER J, MEYER C, PARKER M, HAWK H, 2013. Rede-

- sign of PCR primers for mitochondrial cytochrome c oxidase subunit I for marine invertebrates and application in all-taxa biotic surveys. *Molecular Ecology Resources*, 13(5): 851–861.
- KENNEY M A, SUTTON-GRIER A E, SMITH R F, GREENS S E, 2009. Benthic macroinvertebrates as indicators of water quality: the intersection of science and policy. *Terrestrial Arthropod Reviews*, 2(2): 99.
- KITAGAWA N, 1978. A classification of Japanese lakes based on hypolimnetic oxygen and benthonic fauna. *Japanese Journal of Limnology*, 39: 1–8.
- LEPŠ J, ŠMILAUER P, 2003. *Multivariate analysis of ecological data using CANOCO*. Oxford: Cambridge University Press.
- LI L, ZHENG B, LIU L, 2010. Biomonitoring and bioindicators used for river ecosystems: definitions, approaches and trends. *Procedia Environmental Sciences*, 2: 1510–1524.
- MENETREY N, OERTLI B, LACHAVANNE J, 2011. The CIEPT: a macroinvertebrate-based multimetric index for assessing the ecological quality of Swiss lowland ponds. *Ecological Indicators*, 11: 590–600.
- SWEENEY B W, BATTLE J M, JACKSON J K, DAPKEY T, 2011. Can DNA barcodes of stream macroinvertebrates improve descriptions of community structure and water quality? *Journal of the North American Benthological Society*, 30(1): 195–216.
- VANNI M J, 2002. Nutrient cycling by animals in freshwater ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 33: 341–370.
- XIONG W, LI J, CHEN Y Y, SHAN B Q, WANG W M, ZHAN A B, 2016. Determinants of community structure of zooplankton in heavily polluted river ecosystems. *Scientific Reports*, 6: 22043.

(责任编辑:杨郁霞)

<http://www.jbscn.org/>