

DOI: 10.5846/stxb202007211913

和克俭,刘虹,丁佼,黄晓霞,刘琦,张琦.云南省把边江流域不同土地利用方式对大型底栖动物群落的影响.生态学报,2021,41(23):9525-9535.
He K J, Liu H, Ding J, Huang X X, Liu Q, Zhang Q. Impacts of different land use patterns on macrobenthic communities in the Babian River Basin, Yunnan Province. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(23):9525-9535.

云南省把边江流域不同土地利用方式对大型底栖动物群落的影响

和克俭¹, 刘虹¹, 丁佼^{2,*}, 黄晓霞¹, 刘琦³, 张琦¹

1 云南大学地球科学学院, 昆明 650091

2 云南省水利厅, 昆明 650021

3 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875

摘要: 研究土地利用对大型底栖动物群落的影响, 对流域土地利用规划修编和河流生态修复等有重要意义。以红河上游的把边江流域为研究区, 调查大型底栖动物群落现状, 计算 37 个样点上游集水区土地利用组分、配置、多样性和水文距离 4 个方面 20 个土地利用指标, 分析不同土地利用方式对大型底栖动物群落的影响。本次调查共鉴定出 25 个大型底栖动物分类单元, 其中水生昆虫最多, 占分类单元总数的 72%; 摄食功能群以捕食者 (PR)、刮食者 (SC) 和直接收集者 (GC) 为主。把边江流域城镇用地和林地对大型底栖动物群落的影响占主导地位, 而耕地对大型底栖动物群落的影响较小。影响把边江流域大型底栖动物群落的关键土地利用指标为城镇用地面积比 (3PLA)、城镇用地最大斑块指数 (3LPI)、城镇用地聚合指数 (3AI)、城镇用地水流长度 (3FLOW)、林地最大斑块指数 (1LPI) 和林地形状指数 (1LSI)。土地利用组分、配置和水文距离是影响把边江流域大型底栖动物群落的主要方面, 而土地利用多样性对大型底栖动物群落的影响较小。大型底栖动物物种密度和物种多样性与 3PLA、3LPI、3AI、3FLOW 和 1LSI 呈负相关, 与 1LPI 呈正相关。1LPI 与浮游目 (如小蜉科、扁蜉科) 为代表的清洁物种呈现较明显的正相关关系。城镇用地指标与 SC 和 SH (撕食者) 密度具有显著的负相关关系, 与 GC 密度有较弱的正相关关系, 而与其他功能群没有明显的相关关系。SC 和 SH 对水质和环境条件敏感, 而 GC 对人类干扰耐受性较强。1LPI 与 SC 和 FC (滤食收集者密度) 正相关, 而与 PR 和 GC 密度负相关。SC 和 FC 对生境的完整性要求较高, 而 GC 和 PR 对人为干扰和较为破碎的生境更为适应。一方面, 随着城镇用地的规模、边界复杂性和聚集程度增加, 研究区大型底栖动物密度和多样性降低; 另一方面, 随着林地完整性降低, 大型底栖动物物种均匀度降低。土地利用与大型底栖动物物种多样性和功能群多样性的关系不完全一致, 1LSI 和 3FLOW 与物种多样性负相关, 而与功能群多样性呈正相关关系, 土地利用对物种-功能群-群落不同尺度上的影响差异还需要更深入的研究。

关键词: 土地利用组分和配置; 摄食功能群; 生物多样性; 景观指数; 水生生态系统

Impacts of different land use patterns on macrobenthic communities in the Babian River Basin, Yunnan Province

HE Kejian¹, LIU Hong¹, DING Jiao^{2,*}, HUANG Xiaoxia¹, LIU Qi³, ZHANG Qi¹

1 School of Earth Science, Yunnan University, Kunming 650091, China

2 Water Conservancy Department of Yunnan Province, Kunming 650021, China

3 Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: It is of great significance to study the impact of land use on macrobenthic communities for watershed land use planning revision and river ecological restoration. Taking the Babian River Basin in the upper reaches of the Red River as

基金项目: 全球环境基金 (GEF) 赠款项目 (5665); 国家自然科学基金项目 (32060304)

收稿日期: 2020-07-21; **网络出版日期:** 2021-07-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dingjiao@mail.bnu.edu.cn

research area, the status of macrobenthic communities was investigated. Twenty land use indicators in 4 aspects including composition, allocation, diversity and hydrological distance based on upper catchment area of 37 sampling points were calculated to analyze the impacts of different land use patterns on macrobenthic communities. A total of 25 macrobenthic taxa were identified in this survey, of which aquatic insects accounted for 72% of the total. The main feeding functional groups were predators (PR), scrapers (SC), and gather collectors (GC). The impacts of urban land and woodland on macrobenthic communities were dominant, while the impact of agricultural land was relatively small in the Babian River Basin. The key land use indicators affecting the macrobenthic communities were the percentage of urban land (3PLA), the largest patch index of urban land (3LPI), the aggregation index of urban land (3AI), the flow length of urban land (3FLOW), the largest patch index of woodland (1LPI), and the landscape shape index of woodland (1LSI). Land use composition, allocation and hydrological distance were the main factors affecting macrobenthic communities in the Baibian River Basin, while land use diversity had little effect on macrobenthic community. The species density and diversity of macrobenthos showed negative correlations with 3PLA, 3LPI, 3AI, 3FLOW and 1LSI, while positive correlations with 1LPI. The clean species, such as Ephemeroidea and Heptageniidae, increased with increasing of 1LPI. There were significantly negative correlations between the urban indexes and the density of SC and SH (Shredders), but no significant correlations between the urban indexes with other functional groups. SC and SH were sensitive to water quality and environmental conditions, however, GC were more tolerant of human interference. 1LPI was positively correlated with the density of SC and FC (Filter Collectors), but negatively correlated with the density of PR and GC. SC and FC had higher demands on habitat integrity, while GC and PR were more adaptive to human disturbance and fragmented habitat. On the one hand, with the increase of urban land use, the complexity of boundaries, and the degree of aggregation, the density and species diversity of macrobenthos in the study area decreased. On the other hand, as the integrity of woodland decreased, the species evenness of macrobenthos also decreased. The relationship between land use and macrobenthic species diversity and functional group diversity is not completely consistent, such as 1LSI and 3FLOW are negatively correlated with species diversity, but are positively correlated with functional group diversity. More in-depth researches are needed to investigate the impacts of land use on species, functional groups and communities at different scales.

Key Words: land use composition and allocation; functional feeding groups; biodiversity; landscape index; water ecosystem

大型底栖动物是维系河流水生态系统结构和功能的重要组成部分^[1]。大型底栖动物对环境因子敏感, 迁移能力有限且易于采集, 因此具有较好的河流环境指示作用, 是河流生态学研究备受关注生物类群^[2]。大型底栖动物的群落组成及特征与河流生境关系密切, 而河流生境状况受到上游集水区以及河流周边土地利用情况的影响^[3]。因此, 准确掌握土地利用对大型底栖动物群落的影响关系是研究和管理河流的基础, 是科学指导水生态系统管理、土地利用规划调整、促进河流生境恢复和多样性保护的重要科学依据。土地利用结构和组分对大型底栖动物群落结构的影响是目前相关研究的热点, 研究主要采用统计分析、空间分析等分析方法探究土地利用与大型底栖动物之间关系^[4]。不同尺度下土地利用对大型底栖动物群落的影响比较复杂, 基于样点的上游集水区是目前常用的研究尺度, 能够比较稳定的表达流域土地利用的主要影响^[5]。已有研究表明, 大型底栖动物群落的组成、分布、物种多样性与流域和河流周边主要的土地利用类型有关, 比如以林地为主时, 群落中清洁物种较多, 物种多样性较高; 而以城镇用地为主时, 群落中耐污种优势明显, 物种多样性会显著降低^[6-8]。

目前国内土地利用对大型底栖动物群落影响的相关研究主要集中在东部和南部地区, 西南地区河流的相关研究较少。已有研究对大型河流上游地区土地利用对山区河流大型底栖动物影响的研究尚不充分^[9]; 红河流域、把边江流域大型底栖动物调查数据、土地利用与大型底栖动物关系研究还较为匮乏。因此,

本次研究选择红河上游的把边江流域作为研究对象,在样点上游集水区尺度上,通过实地采样,调查流域大型底栖动物群落的现状,探讨土地利用格局组分、配置、多样性、水文距离对流域大型底栖动物群落的影响,揭示土地利用与大型底栖动物的关系,对科学评价目标流域及相似流域河流生态健康、加强水生生态系统和土地利用管理、促进河流生境恢复和多样性保护有重要意义。

1 研究区域

把边江为红河流域主要支流李仙江的上游段,发源于大理南涧县宝华镇附近。流域地处横断山余脉,哀牢山与无量山的包围地带^[10],东经 100°24′—101°18′、北纬 23°34′—24°56′之间,流域面积约 7600 km²(图 1)。把边江流域地势西北高,东南低,地形以山地为主,地形起伏大,切割较深^[9]。流域气候以亚热带季风气候为主,年均降水量约为 1225.4 mm,年平均气温为 19.0℃^[10]。流域内土地利用以林地为主,城镇用地比例较小^[11]。流域内植被以南亚热带常绿阔叶林与热带季雨林为主^[11]。土壤分布垂直地带性明显,随海拔升高,主要土壤类型依次为红壤、黄壤和黄棕壤^[12]。

2 数据来源与研究方法

2.1 底栖样品采集与实验室处理

在把边江干流和主要支流典型河段共设置 37 个采样点(图 1)。于 2019 年 9 月开展大型底栖动物群落野外调查。在采样点典型河段上,使用 D 形网(40 目纱,0.3 m 宽)采集河流底质,每次采集长度为 3—5 m^[13]。现场采用 60 目网筛对河流底质进行筛洗后,放入密封袋内低温保存,带回驻地进行底栖动物的挑选。底栖动物挑选在采样当天完成,挑选出的底栖样品保存在浓度为 75% 的酒精中带回实验室进行鉴定。鉴定时,参考底栖名录将所有物种鉴定到科级,同时记录每个分类单元的个体数,并依据大型底栖动物的摄食类型进行摄食功能群划分^[13]。物种密度以及功能群密度使用基于物种个体数计算的丰度数据(个/m²)。为了保证分析结果的准确性与科学性,在 37 个采样点中剔除了 6 个只含一个分类单元的样点,后续分析使用剩余的 31 个样点数据。

2.2 空间数据来源和处理

土地利用数据基于 2019 年 4 月 Landsat8 TM 影像(<http://ids.ceode.ac.cn/>)解译。影像空间分辨率为 30 m,云量 < 1%。影像在进行镶嵌、裁剪、校正等预处理后,使用最大似然法对其进行监督分类^[14]。结合遥感目视解译的结果与实地调查的数据,对影像分类结果进行精度评价,本研究土地利用分类总精度为 87%,Kappa 系数为 0.86。根据研究的目的,将研究区的土地利用划分为如下 5 种类型:1)林地;2)耕地;3)城镇用地;4)水体;5)其他用地。

数字高程模型(DEM)使用 ASTER-GDEM V2 数据,下载于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>),数据空间分辨率为 30 m。

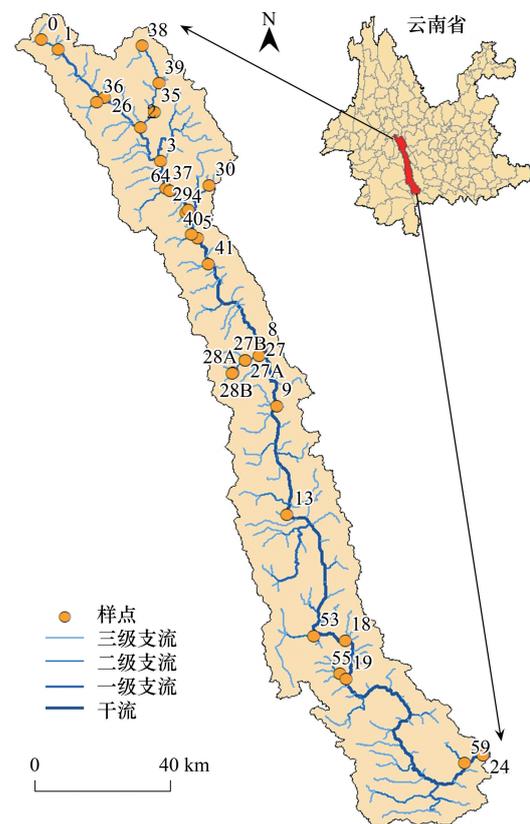


图 1 采样点地理位置示意图

Fig.1 Location of the sampling sites

图中数字为采样点编号

2.3 河网数据和流域集水区提取

基于 DEM 数据使用 ArcGIS 10.2 软件的水文分析工具提取研究区河网数据:首先对原始 DEM 数据进行洼地填充,得到无洼地 DEM;然后利用无洼地 DEM 数据生成水流方向数据,再由水流方向数据进一步计算汇流累积量;设置汇流累积量阈值生成水流路径网络,提取河网信息^[14]。

本研究在采样点上游集水区尺度上进行土地利用和大型底栖动物关系的探讨,所有土地利用指标均基于采样点上游集水区范围提取。样点上游集水区提取方法如下:首先基于 DEM 数据生成的汇流方向数据,使用 ArcGIS 10.2 软件的水文分析工具中的 snap 模块对采样点数据进行校正。以校正后的每个采样点位置为出水口,使用水文分析工具中的 watershed 模块提取每个采样点的上游集水区范围^[14]。整个流域共提取有效集水区 31 个。最后基于提取的集水区范围提取每一个集水区内部的土地利用数据,得到 31 个集水区的土地利用栅格数据,用以后续计算土地利用指标。

2.4 土地利用指标选择与计算

土地利用组分是最常用的土地利用指标,同时有研究表明土地利用的配置、多样性和水文距离等指标同样对于分析土地利用格局有着重要意义^[15]。因此,本文从土地利用的组分、配置、多样性、水文距离 4 个方面选择土地利用指标^[16]。其中组分指标包括土地利用面积比(Percentage of Landscape, PLA),配置指标包括土地利用斑块密度(Patch Density, PD)、景观形状指数(Landscape Shape Index, LSI)、最大斑块指数(Largest Patch Index, LPI)和聚合指数(Aggregation Index, AI),多样性指标包括香农多样性(Shannon's Diversity Index, SHDI)、修正辛普森均匀度(Modified Simpson's Evenness Index, MSIEI),水文距离指标为土地利用的水流长度(Flow Length, FLOW)^[4,14]。

土地利用组分、配置和多样性指标均基于提取的样点上游集水区土地利用栅格数据,采用 FRAGSTATS 4.0 软件进行计算^[4,17]。水文距离基于 DEM 数据,使用 ArcGIS 10.2 软件计算:首先提取水流方向,基于水流方向并以校正后的每个样点位置作为出水口,计算每个栅格像元相对于集水区出水口的水流长度,最终提取每个集区内某土地利用类型所覆盖栅格元的平均水流长度^[14]。

林地(指标代号:1)、耕地(指标代号:2)和城镇用地(指标代号:3)是把边江流域主要的土地利用类型。因此基于三种土地类型分别计算其所对应的土地利用指标,共计得到 20 个土地利用指标(表 1)。并在对应的每个采样点上游集水区计算这 20 个土地利用指标,完成把边江流域土地利用数据的初步收集。考虑到大部分土地利用指标为非正态分布,指标之间存在的相关性和指标冗余可能会影响土地利用指标对大型底栖动物群落特征的解释效果。开展具体分析前,在土地利用指标与底栖群落指标间进行斯皮尔曼秩相关分析^[14,18],通过土地利用指标与底栖群落特征的相关程度,筛选出合适的土地利用指标作为关键因子,进一步研究其对大型底栖动物群落的影响。

2.5 数据分析方法

2.5.1 群落结构分析

大型底栖动物群落原始物种矩阵在 PRIMER 6 软件中进行标准化与 4 次方转换后,计算得到群落多样性与均匀度。大型底栖动物摄食功能群的多样性指标获取也采用相同方法。

2.5.2 相关分析

运用 SPSS 25.0 软件进行 Spearman 相关分析,得到底栖数据与土地利用指标的相关系数与显著性检验结果。

2.5.3 冗余分析

运用 Canoco 5.0 软件进行冗余分析。冗余分析(Redundancy analysis, RDA)即多变量直接环境梯度分析,是一种线性排序分析方法,能有效地评价一组变量与另一组变量之间的关系^[19]。通过 RDA 分析可以得到土地利用指标对大型底栖动物群落特征的解释率以及两者之间的排序图。

表 1 土地利用指标
Table 1 Land use indexes

指标类 Indicator category	指标 Indicator	指标描述 Description of indicator	编码 Code
组分 Composition	土地利用面积比 (PLA)	表示某一斑块类型面积占整个景观面积的百分比	1PLA
			2PLA
			3PLA
配置 Allocation	最大斑块指数 (LPI)	指某斑块类型中最大面积斑块占整个景观面积的百分比,反映斑块类型在景观中的优势程度	1LPI
			2LPI
			3LPI
	斑块密度 (PD)	反映景观的破碎化程度和空间异质性程度	1PD
			2PD
			3PD
景观形状指数 (LSI)	表示构成景观的斑块形状复杂程度。LSI 值越大,说明景观形状越复杂,斑块周边越发达	1LSI	
		2LSI	
		3LSI	
聚合指数 (AI)	反映景观中不同斑块类型的非随机性或聚集程度	1AI	
		2AI	
		3AI	
多样性 Diversity	香农多样性 (SHDI)	反映景观的丰富度和异质性。SHDI 值低说明景观中丰富度低,景观趋于均衡	SHDI
	修正辛普森均匀度 (MSIEI)	反映景观的优势情况。MSIEI 值高说明景观中没有明显的优势类型,各类型分布均匀	MSIEI
水文距离 Hydrological distance	水流长度 (FLOW)	指景观单元内某类型斑块分布的平均水流长度	1FLOW
			2FLOW
			3FLOW

PLA:土地利用面积比 Percentage of Landscape; LPI:最大斑块指数 Largest Patch Index; PD:斑块密度 Patch Density; LSI:景观形状指数 Landscape Shape Index; AI:聚合指数 Aggregation Index; SHDI:香农多样性 Shannon's Diversity Index; MSIEI:修正辛普森均匀度 Modified Simpson's Evenness Index; FLOW:水流长度 Flow Length。指标前的代号 1、2、3 分别代表林地、耕地、城镇用地,数字后的字母缩写代表具体指标,如:1PLA 指林地土地利用面积比,2PLA 指耕地土地利用面积比

3 结果与分析

3.1 土地利用格局特征

把边江流域主要的土地利用类型为林地(面积占比 79.93%),其次为耕地(19.24%)和城镇用地(0.83%)。林地在全流域均有分布,耕地主要沿支流和干流分布,呈现出南北向延伸的特征;城镇用地面积占比很小,主要集中在干流两侧地势较平缓的坝区,如景东县和镇沅县城区等,而在其他区域零散分布(图 2)。

3.2 大型底栖动物物种及功能群组成特征

调查的 31 个样点的底栖动物标本共鉴定出 25 个分类单元(所有物种鉴定到科级水平),归属于 4 个类别:水生昆虫、甲壳动物、软体动物和环节动物^[13,20];隶属于 3 门(节肢动物门、软体动物门、环节动物门)6 纲(昆虫纲、软甲纲、瓣鳃纲、腹足纲、蛭纲、寡毛纲)14 目 25 科。其中水生昆虫种类最多,包含 18 个分类单元,占总分类单元数的 72%,甲壳动物分类单元数为 1,占总分类单元数的 4%;软体动物和环节动物分类单元数均为 3,分别占总分类单元数的 12%(图 3)。

根据底栖动物的摄食习性^[13,21-23],将调查到的底栖物种划分为五个功能摄食类群(表 2):捕食者(Predators, PR)、滤食收集者(Filter Collectors, FC)、直接收集者(Gather Collectors, GC)、刮食者(Scrapers, SC)、撕食者(Shredders, SH)。把边江流域大型底栖动物摄食功能群以捕食者(PR)为主,包含了 7 个分类单元,占总分类单元数的 28%;刮食者(SC)和直接收集者(GC)的分类单元数次之,均有 6 个分类单元,分别占总分类单元数的 24%;滤食收集者(FC)有 5 个分类单元,占总分类单元数的 20%;而撕食者(SH)的分类单元数最少,仅有 1 个分类单元,占总分类单元数的 4%(图 3)。

3.3 关键土地利用指标筛选

物种密度、刮食者 (SC) 密度、物种多样性和功能群多样性与土地利用指标存在比较明显的相关关系。而其他功能群 (GC、FC、PR 和 SH) 密度、物种均匀度、功能群均匀度与土地利用指标均没有显著的相关性 (表 3)。其中物种密度与林地最大斑块面积 (1LPI) 显著正相关 ($P < 0.05$), 与林地形状指数 (1LSI) 和城镇用地水文距离 (3FLOW) 呈显著负相关 ($P < 0.05$); SC 密度与大部分土地利用指标呈现出显著负相关关系 ($P < 0.05$), 但只与林地面积比例 (1PLA) 以及林地最大斑块面积 (1LPI) 呈显著正相关 ($P < 0.05$)。物种多样性则与大部分城镇用地指标 (3PLA、3LPI、3AI、3FLOW) 以及林地水文距离 (1FLOW) 呈显著负相关 ($P < 0.05$)。功能群多样性与城镇用地指标 (3PLA、3LPI、3AI) 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 但其与水文距离没有显著的相关关系 (表 3)。

基于底栖群落和功能群特征与土地利用指标相关分析的结果, 筛选出与两个及两个以上底栖群落和功能群特征相关关系显著的土地利用指标 (1LPI、1LSI、3PLA、3LPI、3AI、3FLOW) 为研究中的土地利用关键因子, 主要包括城镇用地类型和林地类型指标。

3.4 土地利用指标与大型底栖动物群落及功能群的关系

3.4.1 土地利用指标与大型底栖动物群落的关系

选取的关键土地利用指标对大型底栖动物群落组成的总解释率为 24.8%。排序轴可分为 2 个轴; 其中第一轴从左至右林地最大斑块面积 1LPI 值逐渐降低, 以浮游目 (如小蜉科、扁蜉科) 为代表的清洁物种与第一轴呈现较明显的正相关; 第二轴和 1LSI 与所有的城镇用地指标 (3PLA、3LPI、3AI、3FLOW) 密切相关, 并且扁蛭科、颤蚓科等耐污物种与这些指标呈现较强的正相关性 (图 4)。

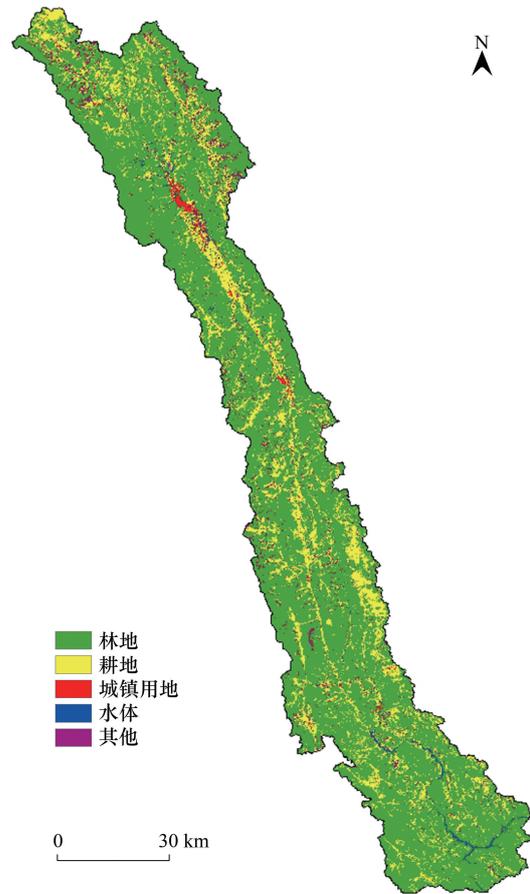


图 2 把边江流域土地利用类型

Fig.2 Land use patterns of the Babian River Basin

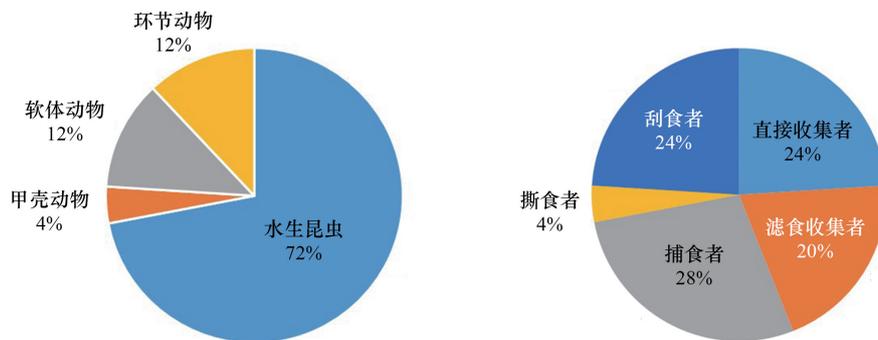


图 3 大型底栖动物群落物种组成和摄食功能群物种组成

Fig.3 Species composition and functional feeding groups composition of macrobenthic communities

表 2 大型底栖动物分类单元及摄食功能群

Table 2 Taxa and functional feeding groups of macrobenthos

摄食功能群 Functional feeding groups	分类单元(科) Taxa (family)	摄食功能群 Functional feeding groups	分类单元(科) Taxa (family)
捕食者 Predators, PR	网襁科 Perlodidae	直接收集者 Gather Collectors, GC	颤蚓科 Tubificidae
	盖螭科 Aplelocheiridae		细裳蜉科 Leptophlebiidae
	划螭科 Corixidae		四节蜉科 Baetidae
	螳科 Coenagrionidae		河花蜉科 Prosoptomatidae
	龙虱科 Dytiscidae	小蜉科 Ephemeroidea	
	扁蜉科 Glossiphoniidae	摇蚊科 Chironomidae	
	石蜉科 Herpobdellidae	刮食者 Scrapers, SC	泥甲科 Dryopidae
等蜉科 Isonychiidae	瘤石蛾科 Goeridae		
纹石蛾科 Hydropsychidae	扁泥甲科 Dryopoidea		
石蚕科 Phryganea Larva	扁蜉科 Heptageniidae		
球蜉科 Sphaeriidae	蛄螺科 Hydrobiidae		
长臂虾科 Palaemonidae	椎实螺科 Lymnaeidae		
滤食收集者 Filter Collectors, FC	大蚊科 Tipulidae		

表 3 大型底栖动物群落和功能群特征指标与土地利用指标相关系数

Table 3 Correlation coefficient between macrobenthic community and functional group indexes and land use indexes

	密度 Density					多样性 Diversity		均匀度 Evenness		
	物种	GC	FC	PR	SH	SC	物种	功能群	物种	功能群
1PLA	0.292	-0.015	0.287	-0.169	0.104	0.493 **	0.267	0.249	0.086	0.104
2PLA	-0.260	0.033	-0.304	0.300	-0.070	-0.482 **	-0.215	-0.119	0.002	-0.058
3PLA	-0.339	-0.113	-0.227	-0.009	-0.282	-0.446 *	-0.401 *	-0.417 *	-0.133	-0.132
1PD	-0.177	0.155	-0.238	0.112	0.076	-0.397 *	-0.116	-0.195	-0.221	-0.169
2PD	0.142	-0.028	0.238	0.025	-0.195	0.077	0.151	0.077	0.168	0.058
3PD	-0.145	-0.052	-0.049	0.158	-0.294	-0.391 *	-0.224	-0.234	-0.133	-0.178
1LPI	0.365 *	0.006	0.308	-0.211	-0.147	0.327 *	0.178	0.150	0.184	0.223
2LPI	0.190	0.051	-0.055	0.163	0.211	0.035	0.062	-0.095	-0.306	-0.121
3LPI	-0.307	-0.107	-0.214	-0.139	-0.208	-0.360	-0.399 *	-0.458 *	-0.195	-0.102
1LSI	-0.390 *	-0.171	-0.192	0.143	-0.131	-0.489 **	-0.302	-0.086	0.194	0.078
2LSI	-0.160	-0.071	0.029	0.040	-0.145	-0.328	-0.181	0.055	0.114	-0.006
3LSI	-0.314	-0.175	-0.143	0.099	-0.291	-0.440 *	-0.336	-0.132	0.129	0.054
1AI	0.096	-0.147	0.164	-0.330	-0.008	0.244	-0.044	0.041	0.137	0.189
2AI	-0.269	0.007	-0.293	0.267	-0.045	-0.422 *	-0.244	-0.125	-0.086	-0.052
3AI	-0.310	-0.041	-0.292	-0.288	-0.234	-0.364 *	-0.429 *	-0.429 *	-0.031	0.026
1FLOW	-0.336	-0.323	-0.117	-0.076	-0.115	-0.309	-0.362 *	0.014	0.302	0.228
2FLOW	-0.320	-0.204	-0.122	0.065	-0.101	-0.376 *	-0.307	0.033	0.257	0.167
3FLOW	-0.426 *	-0.320	-0.143	0.051	-0.027	-0.446 *	-0.356 *	-0.002	0.283	0.210
SHDI	-0.282	0.003	-0.277	0.129	-0.143	-0.497 **	-0.320	-0.293	-0.109	-0.103
MSIEI	-0.296	0.047	-0.300	0.133	-0.134	-0.512 **	-0.288	-0.279	-0.100	-0.092

表中数值为相关系数, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$; GC: 直接收集者 Gather Collectors; FC: 滤食收集者 Filter Collectors; PR: 捕食者 Predators; SH: 撕食者 Shredders; SC: 刮食者 Scrapers

土地利用指标对大型底栖动物物种密度、物种多样性和物种均匀度的总解释率为 31.2%。大型底栖动物物种密度和物种多样性与城镇用地指标(3PLA、3LPI、3AI、3FLOW)和 ILSI 呈负相关,城镇用地的规模越大、边界越复杂、聚集程度越高、林地完整性越低,底栖动物的密度和多样性越低;而均匀度与林地最大斑块面积(1LPI)呈较明显的正相关关系,与城镇用地指标之间呈较弱的正相关(3FLOW 和 1LSI)或负相关(3AI、3PLA

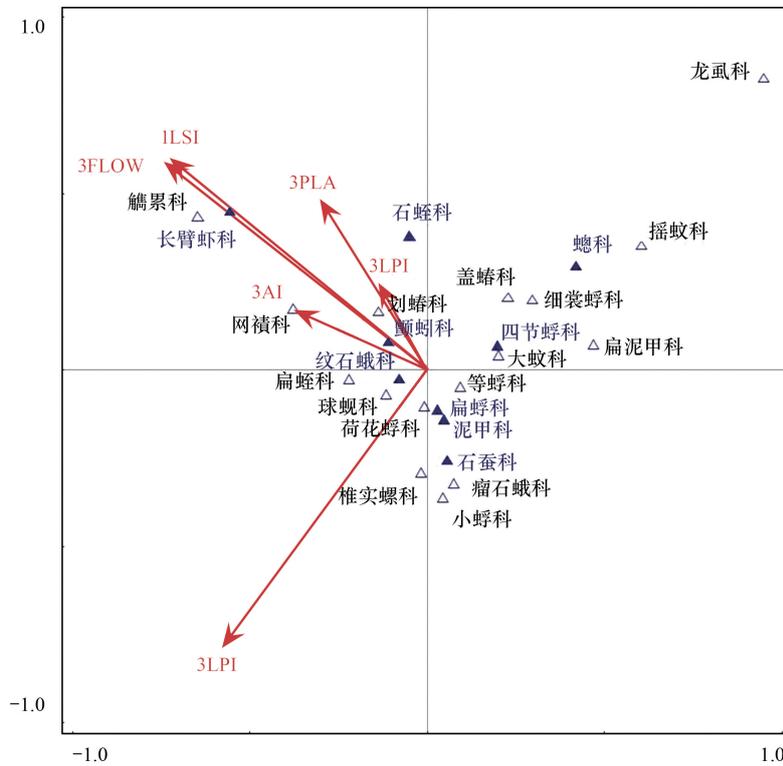


图 4 土地利用指标与大型底栖动物物种排序

Fig.4 Land use indicators and macrobenthic species ranking

图中蓝色字体实心蓝色三角形为优势物种。PLA: 土地利用面积比 Percentage of Landscape; LPI: 最大斑块指数 Largest Patch Index; LSI: 景观形状指数 Landscape Shape Index; AI: 聚合指数 Aggregation Index; FLOW: 水流长度 Flow Length。指标前的代号 1、2、3 分别代表林地、耕地、城镇用地, 数字后的字母缩写代表具体指标, 如: 3PLA 指城镇用地土地利用面积比

和 3LPI) (图 5)。

3.4.2 土地利用指标与大型底栖动物摄食功能群的关系

土地利用指标对大型底栖动物摄食功能群特征的总解释率为 30.4%。底栖动物功能群多样性、均匀度以及刮食者 (SC) 密度与城镇用地指标 (3PLA、3LPI、3AI) 呈强负相关, 直接收集者 (GC) 密度与城镇用地指标 (3PLA、3LPI、3AI) 呈正相关; 撕食者 (SH)、捕食者 (PR) 密度与城镇用地水文距离 (3FLOW) 呈正相关, 过滤收集者 (FC) 密度与城镇用地水文距离 (3FLOW) 呈负相关 (图 6)。

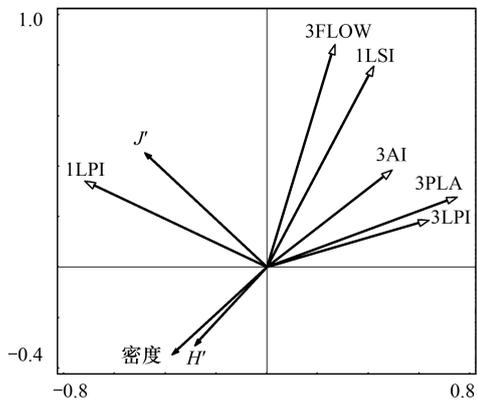


图 5 土地利用指标与大型底栖动物群落指标排序

Fig.5 Land use indexes and macrobenthic community indexes ranking

H': 物种多样性 Species diversity; J': 物种均匀度 Species evenness

4 讨论

4.1 影响大型底栖动物群落的土地利用指标

把边江流域影响大型底栖动物的关键土地利用指标为 1LPI、1LSI、3PLA、3LPI、3AI、3FLOW, 主要是城镇用地指标和林地指标, 耕地类型指标并未入选。城镇用地在研究流域面积占比很小 (0.83%), 但城镇用地对大型底栖动物群落的影响仍然占主导地位。结果表明自然河流, 尤其是山区河流中的底栖动物群落对城市化几乎没有抵抗能力, 及其轻微的城市化的过程, 都有可能对底栖动物产生明显的影响^[24-25]。研究区耕地对于流域大型底栖动物群落的影响较小, 而有研究表明耕地对水质和底栖动物群落存在明显影响^[26-27]。不同研

究结果的差异可能与本研究区位于大型河流上游,地形以山地为主,耕地面积较小,农业面源污染较小有关^[11]。在筛选出的关键因子中,指标类型包括组分指标(3PLA)、配置指标(1LSI、1LPI、3LPI、3AI)以及水文距离指标(3FLOW)。结果表明在土地利用与大型底栖动物的关系研究中,仅依据组分指标是不全面的,土地利用配置指标往往比组分指标更能准确指示大型底栖动物群落特征^[15]。而土地利用多样性指标与大多数底栖动物指标没有显著相关,这可能与研究区位于大型河流上游,不同样点集水区的土地利用以均林地为主,土地利用格局差异较小有关。

4.2 土地利用对大型底栖动物群落物种的影响

大型底栖动物物种密度和物种多样性与城镇用地指标(3PLA、3LPI、3AI、3FLOW)和1LSI呈负相关,该结论与前人的研究相吻合^[1,6]。城镇用地的规模、斑块形状、聚集程度等与水质污染存在关联^[23]。随着人类活动增加,城镇用地的规模、边界复杂性和聚集程度增加,城镇生活及生产过程中产生的污染物排放随之增加,影响

到大型底栖动物群落的组成和结构,导致大型底栖动物物种密度和多样性降低。林地最大斑块面积(1LPI)与浮游目(如小蜉科、扁蜉科)为代表的清洁物种呈现较明显的正相关。1LPI表达了林地景观的完整程度和优势度^[14]。林地具有较好的底质和生态环境,能为敏感物种提供生存的空间,为底栖动物提供丰富的食物来源,有利于大型底栖动物群落维持较高的物种多样性^[28];同时林地内丰富的植被可发挥吸附消除部分污染的功能,从而起到保持水体清洁的作用,对河流的环境保护和改善十分重要^[29]。因此,可在城镇用地与河流之间建立以林地为主的沿岸缓冲带,以此减少城镇用地对大型底栖动物群落的影响。

4.3 土地利用对大型底栖动物群落摄食功能群的影响

把边江流域大型底栖动物功能摄食类群以捕食者(PR)、刮食者(SC)和直接收集者(GC)为主,而撕食者(SH)较少。这一结果与珠江上游河段山区河流的研究结果有共同之处^[21]。撕食者较少可能由地貌所致,把边江流域具有典型的峡谷地貌,切割深,枯枝落叶和荫蔽的条件不足,导致撕食者的生存受到限制。

城镇用地相关指标与SC和SH具有明显的负相关关系,而与GC有较弱的正相关关系,与其他功能群没有明显的相关,其结果与SC和SH对水质和环境条件敏感,而GC对人类干扰耐受性较强的结论一致^[30]。同时,代表的生境完整性的1LPI与SC和FC具有明显的正相关,而与PR和GC具有明显的负相关关系,说明SC和FC可能对生境的完整性要求较高,而GC和PR可能对人为干扰和较为破碎的生境更为适应。3AI、3LPI、3PLA、1LPI与功能群多样性和物种多样性关系一致,而1LSI和3FLOW与功能群多样性与物种多样性的关系相反,表现为1LSI和3FLOW与物种多样性负相关,而与功能群多样性呈正相关关系。1LSI为林地地形指数,其值越大表示生境破碎及环境干扰的程度越高,从而减弱环境的稳定性,导致生境中生存的底栖物种减少^[31-32],但因此增加的环境异质性可能利于不同功能群的底栖动物更好地共存。3FLOW表示城镇用地水文距离,该距离越长意味着可能有更多的污染物被径流裹挟进入河流,导致水体污染加重,进而使大型底栖动物密度和多样性下降^[33-34]。

5 结论

通过研究证实,在大型河流上游,以林地为主要土地利用类型的把边江流域,城镇用地和林地对大型底栖

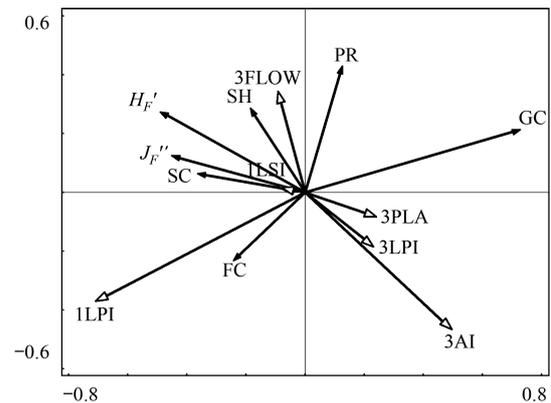


图6 土地利用指标与大型底栖动物功能群指标排序

Fig.6 Land use indexes and macrobenthic functional group indexes ranking

H_F' :功能群多样性 Functional group diversity; J_F' :功能群均匀度 Functional group evenness; PR:捕食者 Predators; FC:滤食收集者 Filter Collectors; SH:撕食者 Shredders; GC:直接收集者 Gather Collectors; SC:刮食者 Scrapers

动物群落的影响占主导地位,而耕地对大型底栖动物群落的影响较小。城镇用地的规模、边界复杂性、聚集程度以及林地景观的完整程度和优势度是影响研究区大型底栖动物群落的主要因素。随着城镇用地的规模、边界复杂性和聚集程度增加,研究区大型底栖动物密度和多样性降低;而随着林地完整性降低,大型底栖动物物种均匀度降低。土地利用与大型底栖动物物种多样性和功能群多样性的关系不完全一致。人类活动增加导致的生境破碎化、环境干扰程度的增加、以及水体污染的加重可能会导致底栖动物物种密度和物种多样性的降低,但因此增加的环境异质性可能利于不同功能群的底栖动物更好地共存。土地利用对物种-功能群-群落不同尺度上的影响差异还需深入研究。

参考文献 (References):

- [1] 王强, 庞旭, 王志坚, 袁兴中, 张耀光. 城市化对河流大型底栖动物群落的影响研究进展. 生态学报, 2017, 37(18): 6275-6288.
- [2] 张勇, 刘朔孺, 于海燕, 刘东晓, 王备新. 钱塘江中游流域不同空间尺度环境因子对底栖动物群落的影响. 生态学报, 2012, 32(14): 4309-4317.
- [3] 李艳利, 李艳粉, 徐宗学. 影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析. 环境科学, 2015, 36(1): 94-106.
- [4] 束邱恺. 巢湖流域不同尺度单元土地利用方式及其对河流水质的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016: 107-107.
- [5] 吴璟, 杨莲芳, 姜小三, 李强, 王备新. 浙江西苕溪土地利用变化对溪流大型底栖无脊椎动物完整性的影响. 生态学报, 2008, 28(3): 1183-1191.
- [6] 李法云, 郎红伟, 王艳杰, 范志平, 陈佳勃, 鞠文鹏. 辽河流域典型支流土地利用方式对大型底栖动物群落时空分布特征的影响. 环境科学学报, 2016, 36(3): 767-777.
- [7] Larsen S, Ormerod S J. Combined effects of habitat modification on trait composition and species nestedness in river invertebrates. *Biological Conservation*, 2010, 143(11): 2638-2646.
- [8] Lenat D R, Crawford J K. Effects of land use on water quality and aquatic biota of three North Carolina Piedmont streams. *Hydrobiologia*, 1994, 294(3): 185-199.
- [9] 王慧丽, 万安, 张晓可. 不同土地利用方式对皖南山区河流底栖动物群落结构的影响. 宿州学院学报, 2015, 30(7): 110-113.
- [10] 李运刚, 何大明, 叶长青. 云南红河流域径流的时空分布变化规律. 地理学报, 2008, 63(1): 41-49.
- [11] 钟佳, 肖振国. 李仙江流域水生态保护研究. 水文, 2009, 29(S1): 181-183.
- [12] 周乐福. 云南土壤分布的特点及地带性规律. 山地研究, 1983, 1(4): 31-38.
- [13] Fu L, Jiang Y, Ding J, Liu Q, Peng Q Z, Kang M Y, Wang L Z. Spatial variation of macroinvertebrate community structure and associated environmental conditions in a subtropical river system of southeastern China. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, 2015, (416): 17.
- [14] Ding J, Jiang Y, Liu Q, Hou Z J, Liao J Y, Fu L, Peng Q Z. Influences of the land use pattern on water quality in low-order streams of the Dongjiang River basin, China: A multi-scale analysis. *Science of the Total Environment*, 2016, 551-552: 205-216.
- [15] Uuemaa E, Roosaare J, Mander Ü. Scale dependence of landscape metrics and their indicatory value for nutrient and organic matter losses from catchments. *Ecological Indicators*, 2005, 5(4): 350-369.
- [16] 和克俭, 黄晓霞, 丁佼, 刘琦, 江源. 基于 GWR 模型的东江水质空间分异与水生态功能分区验证. 生态学报, 2019, 39(15): 5483-5493.
- [17] 额尔敦. 土地利用与景观格局变化对流域侵蚀产沙的影响[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [18] 刘朔孺. 钱塘江流域不同土地利用类型对底栖生物群落结构的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [19] Legendre P, Oksanen J, Braak C. Testing the significance of canonical axes in redundancy analysis. *Methods in Ecology and Evolution*, 2011, 2(3): 269-277.
- [20] 孟瑶. 七星河自然保护区大型底栖动物功能群特征及其时空变化研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.
- [21] 朱晨曦, 莫康乐, 唐磊, 吴焱, 李婷, 林育青, 陈求稳. 漓江大型底栖动物功能摄食类群时空分布及生态效应. 生态学报, 2020, 40(1): 60-69.
- [22] 任海庆, 袁兴中, 刘红, 岳俊生, 王晓锋, 刘双爽, 齐静. 重庆五布河壶穴形态及底栖动物群落特征. 生态学杂志, 2015, 34(12): 3402-3408.
- [23] 张亚, 丁森, 张远, 高欣, 王书平, 林佳宁. 太子河流域土地利用对大型底栖动物功能摄食类群的影响. 环境科学研究, 2018, 31(9): 1527-1536.
- [24] Brown L R, Cuffney T F, Coles J F, Fitzpatrick F, McMahon G, Steuer J, Bell A H, May J T. Urban streams across the USA: lessons learned from studies in 9 metropolitan areas. *Journal of the North American Benthological Society*, 2009, 28(4): 1051-1069.

- [25] Cuffney T F, Brightbill R A, May J T, Waite I R. Responses of benthic macroinvertebrates to environmental changes associated with urbanization in nine metropolitan areas. *Ecological Applications*, 2010, 20(5): 1384-1401.
- [26] Kibena J, Nhapi I, Gumindoga W. Assessing the relationship between water quality parameters and changes in landuse patterns in the Upper Manyame River, Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2014, 67-69: 153-163.
- [27] Rasmussen J J, Wiberg-Larsen P, Baattrup-Pedersen A, Friberg N, Kronvang B. Stream habitat structure influences macroinvertebrate response to pesticides. *Environmental Pollution*, 2012, 164: 142-149.
- [28] Rasmussen J J, McKnight U S, Loinaz M C, Thomsen N I, Olsson M E, Bjerg P L, Binning P J, Kronvang B. A catchment scale evaluation of multiple stressor effects in headwater streams. *Science of the Total Environment*, 2013, 442: 420-431.
- [29] Suga C M, Tanaka M O. Influence of a forest remnant on macroinvertebrate communities in a degraded tropical stream. *Hydrobiologia*, 2013, 703(1): 203-213.
- [30] 沈洪艳, 曹志会, 刘军伟, 王文欢, 张远. 太子河流域大型底栖动物功能摄食类群与环境要素的关系. *中国环境科学*, 2015, 35(2): 579-590.
- [31] Sun R H, Wang Z Z, Chen L D, Wang W W. Assessment of surface water quality at large watershed scale: land-use, anthropogenic, and administrative impacts. *Journal of the American Water Resources Association*, 2013, 49(4): 741-752.
- [32] Bu H M, Meng W, Zhang Y, Wan J. Relationships between land use patterns and water quality in the Taizi River basin, China. *Ecological Indicators*, 2014, 41: 187-197.
- [33] 李宁, 陈阿兰, 杨春江, 孙瑜旸, 马国良, 马琪. 城镇化对湟水河上游水质和底栖动物群落结构的影响. *生态学报*, 2017, 37(10): 3570-3576.
- [34] 刘志刚, 渠晓东, 张远, 马淑芹, 赵瑞, 曹国凭. 浑河主要污染物对大型底栖动物空间分布的影响. *环境工程技术学报*, 2012, 2(02): 116-123.