

西藏尼木玛曲底栖动物群落结构初探

杨凤琴^{1,2,3} 屈兴乐^{5,6} 索娜卓嘎⁴ 葛梦娟^{1,2,3} 张继峰^{1,2,3*}

(1. 西藏大学 生态环境学院 青藏高原生物多样性与生态环境保护教育部重点实验室; 2. 拉萨城市湿地生态系统西藏自治区野外科学观测研究站; 3. 西藏大学 青藏高原生态文明协同创新中心; 4. 西藏自治区生态环境监测中心, 西藏拉萨 850000; 5. 西藏农牧大学 高原生态研究所; 6. 西藏自治区高寒植被生态安全重点实验室, 西藏林芝 860000)

摘要 本研究选取雅鲁藏布江的支流尼木玛曲为研究对象, 研究溪流大型底栖动物群落结构及其生态功能。于2023年8月对尼木玛曲流域进行了大型底栖动物调查。调查结果表明: 共采集大型底栖动物样本44种(属), 隶属于3门8目19科。在目水平主要是以EPT类群(蜉蝣目 Ephemeroptera、襉翅目 Plecoptera、毛翅目 Trichoptera)为主, 占总数46.47%。从功能摄食类群来看, 直接收集者占据绝对优势, 比例为61.80%。该流域优势种为同襉属(*Isoperla* sp.)、四节蜉属(*Baetis* sp.)、直突摇蚊属(*Orthocladius* sp.)、帕摇蚊属(*Pagastia* sp.)。大型底栖动物的总平均密度为62 (ind/m²), 总平均生物量为0.4447 (g/m²)。从上游至下游, 收集者的相对丰度逐渐减少, 撕食者的相对丰度逐渐增加, 刮食者的相对丰度变化不大。这一现象与经典河流连续体理论规律存在差异, 可能是因为该河流上游底质多为砾石和石块, 为收集者提供了适宜的生存条件, 而下游因经过城镇, 外源有机物和营养盐输入增加, 可能促进了部分撕食者(如环足摇蚊属、多足摇蚊属、大蚊属)的繁衍, 导致其比例升高。Pielou指数和Margalef指数均随海拔上升呈显著下降趋势($p < 0.05$), 表明高海拔地区优势种占据主导地位, 大型底栖动物群落结构可能受低温、低氧等环境因素的限制, 导致群落物种组成单一。

关键词 尼木玛曲; 底栖动物; 摄食功能类群; 生物多样性; 群落结构

中图分类号: Q958.8

文献标志码: A

文章编号: 2096-4781 (2025) 06-0767-10

DOI: 10.19707/j.cnki.jpa.2025.06.010

A Preliminary Study of the Benthic Animal Community Structure in Nimu Maqu, Xizang

YANG Fenqin^{1,2,3}, QU Xingle^{5,6}, SUONA Zhuoga⁴, ZHANG Jifeng^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Biodiversity and Ecological Environment Protection on the Qinghai-Tibet Plateau, School of Ecology and Environment, Tibet University; 2. Field Scientific Observation and Research Station of Lasa Urban Wetland Ecosystem, Xizang Autonomous Region; 3. Collaborative Innovation Center for Ecological Civilization on the Qinghai-Tibet Plateau; 4. Ecological Environment Monitoring Center of Xizang Autonomous Region, Lasa, Xizang 850000, China; 5. Institute of Plateau Ecology, Xizang Agricultural and Animal Husbandry University; 6. Key Laboratory of Alpine Vegetation and Ecological Security, Xizang Autonomous Region, Linzhi, Xizang 860000, China)

Abstract: This study investigated the macroinvertebrate community structure and ecological

收稿日期: 2025-03-27

作者简介: 杨凤琴(1999-), 女, 汉族, 甘肃张掖人, 硕士生。研究方向: 主要从事高原河流底栖动物群落结构方面的研究。

通信作者: 张继峰(1986-), 男, 汉族, 河南信阳人, 博士, 教授。研究方向: 主要从事高原生态系统演化等方面的研究。

基金项目: 西藏自治区自然科学基金项目(XZ202301ZR0014G); 国家自然科学基金面上项目(42371170); 西藏自治区科技计划基地与人才计划项目(XZ202501JD0019)。

functions in the Nimu Maqu River, a tributary of the Yarlung Zangbo River, through basin-wide sampling conducted in August 2023. A total of 44 macroinvertebrate taxa (species/genus level) were identified, spanning 3 phyla, 8 orders, and 19 families, with EPT taxa (Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera) dominating at the ordinal level (46.47% of total abundance). Functional feeding group analysis revealed collector-gatherers as the predominant group 61.80%, represented by dominant species including *Isoperla* sp. (Plecoptera), *Baetis* sp. (Ephemeroptera), *Orthocladius* sp., and *Pagastia* sp. (Diptera). The community exhibited a mean density of 62 (ind./m²) and biomass of 0.4447 (g/m²). Longitudinal spatial patterns showed progressive downstream declines in collector-gatherer abundance contrasted by increasing shredder dominance, while scrapers remained relatively stable—a deviation from the River Continuum Concept (RCC). This anomaly was attributed to substrate heterogeneity and anthropogenic influences: gravel-cobble substrates in upstream reaches favored collector-gatherers, whereas urbanized downstream areas with enhanced allochthonous organic inputs promoted shredder proliferation (*Cricotopus* sp., *Polypedilum* sp., *Tipula* sp.). Furthermore, significant altitudinal declines in Pielou's evenness (J) and Margalef's richness (d) indices ($p < 0.05$) indicated taxonomic homogenization at higher elevations, suggesting environmental filtering through hypoxic and thermal stressors constraining community assembly.

Key words: Nimu Maqu; Benthic Animal; Functional Feeding Groups; Biodiversity; Community Structure

底栖动物作为淡水生态系统的重要指示类群，其群落组成与摄食功能结构可敏感反映水质变化及能量流动特征^[1]。EPT类群（蜉蝣目 Ephemeroptera、襉翅目 Plecoptera、毛翅目 Trichoptera）因对清洁水体的高度依赖性，常被用作水质生物评价的关键指标^[1]。摇蚊科（Chironomidae）类群的广泛分布则暗示其对中度干扰或富营养化环境的适应性^[2,3]。摄食功能类群指的是具有相同生态功能的物种集合。依据河流大型底栖动物的摄食方式、运动能力以及在生态系统中所发挥的作用等，对其进行功能类群的划分^[4,5]，通常将底栖动物分为：直接收集者（GC）、捕食者（PR）、过滤收集者（FC）、刮食者（SC）和撕食者（SH）五大功能类群^[6-9]。

青藏高原作为全球重要的生态屏障与水源涵养区，其高寒河流生态系统对区域生物多样性维持及水文调节具有关键作用^[10]。2015年，李正飞等^[11]在雅鲁藏布江中下游大型底栖动物的物种多样性及其影响因素进行了研究。结果显示，该区域的底栖动物群落结构受到水文特征、营养盐及底质类型等多种环境因子影响；2017年至2018年，扎西拉姆等人^[11]利用周丛藻类生物完整性指数评估拉萨河下游水质健康状况，结果表明该区域水质受一定程度的人为干扰影响；2019年，刘惠秋等人^[12]基于浮游植物完整性指数评估了雅鲁藏布江中上游河流水生态健康状况，结果表明该区域水生态状况总体良好，但部分河段存在一定程度的人为干扰影响。西藏地区现有关于河流水生态研究多数只关注大型河流，对高山溪流水生态健康研究则相对空白。尼木玛曲作为雅鲁藏布江北岸一级支流，发源于念青唐古拉山脉南麓，流经拉萨市尼木县，周围植被以天然灌木林为主^[13,14]。由于极端环境与交通条件的限制，该流域内大型底栖动物群落结构及其生态功能尚未有研究。本研究于2023年8月对尼木玛曲11个样点进行底栖动物调查，旨在揭示尼木玛曲底栖动物群落组成及其生态指示意义。研究结果可为西藏地区高山溪流生态保护及生物监测提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区域

尼木玛曲位于89°40' - 90°40'E和29°20' - 30°30'N之间,发源于拉萨市尼木县北部念青唐古拉山脉南麓,自北向南流经尼木县吞巴镇、续迈乡、尼木乡,最终在尼木县塔荣镇东南部汇入雅鲁藏布江。该河流为雅鲁藏布江北岸一级支流、尼木县境内重要县级河流^[13,14]。全流域面积约1 850 km²,河长约115 km,河流形态整体呈“C”型^[13],海拔在4 000~4 800 m之间,气候属高原温带半干旱季风气候区,夏季降水集中,紫外线辐射强,局部有洪涝、泥石流,湿度较小^[14]。年平均气温7.6 °C,最冷月平均气温-1.9 °C,最热月平均气温15.8 °C,历年极端最高气温29.3 °C,极端最低气温-18.0 °C^[14]。降水较少,降水主要集中在夏秋两季,年平均降水量54.4 mm,其中5 - 10月降水量335.5 mm,占全年降水量的95%^[14]。

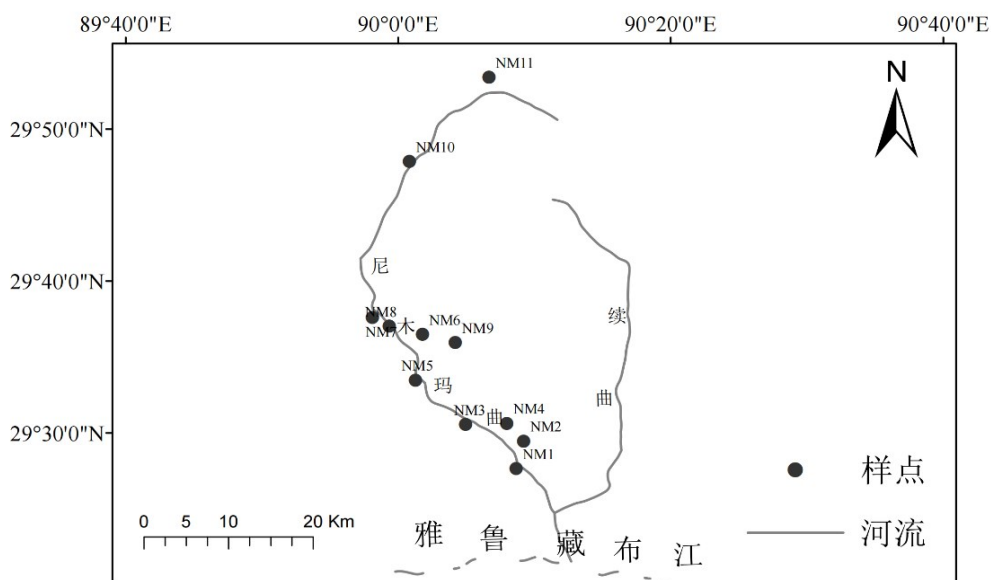


图1 尼木玛曲采样点分布图

Fig.1 Distribution of sampling sites in Nimu Maqu

1.2 样本采集与处理

本研究在2023年8月对尼木玛曲(见图1)进行底栖动物初步调查(见表1),共设计11个样点,各样点命名及其对应的海拔如下:NM1(3 803 m)、NM2(3 927 m)、NM3(3 951 m)、NM4(4 028 m)、NM5(4 183 m)、NM6(4 266 m)、NM7(4 274 m)、NM8(4 276 m)、NM9(4 285 m)、NM10(4 584 m)、NM11(5 150 m)。根据可涉水情况,在鹅卵石-砾石底质为主的可涉水区域采用D型网对各样点底栖动物进行定量(0.3×2.0 m)和定性采集,定性采集目的是对定量采集的种类进行补充和完善。采集样品经60目铜筛洗净后,在白色解剖盘中将动物标本拣出,储存在50 mL的聚酯(PET)标本瓶中,并使用75%浓度的酒精固定^[1]。参考Aquatic insects of China useful for monitoring water quality^[15]、《中国北方摇蚊幼虫》^[16]等相关资料对动物标本进行鉴定^[17-21]。水生昆虫除摇蚊(鉴定到种或属)外,皆在解剖镜下鉴定到科或属。多数软体动物和水栖寡毛类均鉴定到种。鉴定完成后,记录每个物种的个数(条),并用吸水纸将动物体表的水分吸干,由精确度为0.0 001 g的电子天平称量湿重。

1.3 数据分析

通过 Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、Margalef 丰富度指数 (d)、Pielou 均匀度指数 (J)、Simpson 指数 (D) 计算底栖动物群落多样性指数。通过优势度指数 (Y , 当 $Y > 0.02$ 时, 即为优势种) 确定群落中的优势种, 计算公式如下:

$$\text{Shannon-Wiener 多样性指数: } H' = -\sum(P_i)(\ln P_i) \quad (1)$$

$$\text{Margalef 丰富度指数: } d = (S-1)/\ln N \quad (2)$$

$$\text{Pielou 均匀度指数: } J = H'/\ln S \quad (3)$$

$$\text{Simpson 指数: } D = 1 - \sum P_i^2 \quad (4)$$

$$\text{优势度指数: } Y = n_i/N \times f_i \quad (5)$$

式中: P_i 为第 i 种个体数量与总个体数量的比值; n_i 为第 i 种的个体数量; N 为物种的总个体数量; f_i 为第 i 种在各断面出现的频率; S 为样点的总种类数。

使用 ArcGIS 10.8 绘制采样点位图, 文中各类图表均采用 Origin 2024 和 Excel 2021 软件对相关数据进行处理。

2 结果与分析

2.1 群落结构组成

本次调查共采集底栖动物样本 44 种 (属), 隶属于 3 门 8 目 19 科 (表 1)。首先, 就分类群而言, 底栖动物群落主要以 EPT 和摇蚊科类群为主, 分别是总数的 46.47% 和 40.63% (见图 2)。其他类群占比相对较低, 包括其他昆虫 (7.54%)、寡毛类 (4.62%)、软体动物 (0.49%) 及其他未分类类群 (0.24%)。其次, 功能摄食类群显示 (见图 3), 直接收集者占据绝对优势, 比例为 61.80%, 其次为捕食者 (25.06%) 和过滤收集者 (9.97%)。而刮食者 (0.97%) 和撕食者 (2.18%) 占比极低。该研究区域的优势种为: 同禳属 (*Isoperla* sp.)、四节蜉属 (*Baetis* sp.)、直突摇蚊属 (*Orthocladius* sp.)、帕摇蚊属 (*Pagastia* sp.) (见表 2)。

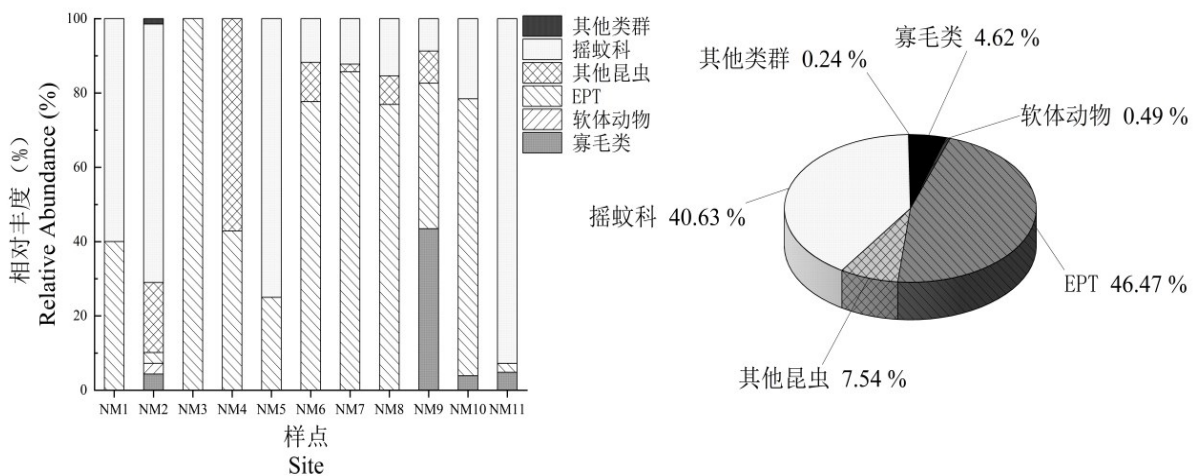


图2 尼木玛曲底栖动物分类群

Fig.2 Taxonomic groups of benthic animals in the Nimu Maqu Basin

续表

物种	功能摄食类群 FFGs	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
拟枝角摇蚊属 <i>Paracladopelma</i> sp.	FC											+
小突摇蚊属 <i>Micropsectra</i> sp.	GC				+							
多足摇蚊属 <i>Polypedilum</i> sp.	SH	+		+	+	+		+		+		
环足摇蚊属 <i>Cricotopus</i> sp.	SH		+							+		
心突摇蚊属 <i>Cardiocladius</i> sp.	PR		+									
毛突摇蚊属 <i>Chaetocladius</i> sp.	GC								+		+	
真开氏摇蚊属 <i>Eukiefferiella</i> sp.	GC		+		+				+			
毛胸摇蚊属 <i>Heleniella</i> sp.	GC	+										
直突摇蚊属 <i>Orthocladius</i> sp.	GC	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+
拟开氏摇蚊属 <i>Parakiefferiella</i> sp.	GC		+									
无突摇蚊属 <i>Ablabesmyia</i> sp.	PR					+	+					
大粗腹摇蚊属 <i>Macropelopia</i> sp.	PR	+	+									
寡角摇蚊属 <i>Diamesa</i> sp.	GC						+			+		
帕摇蚊属 <i>Pagastia</i> sp.	GC				+	+	+	+		+	+	+
单寡角摇蚊属 <i>Monodiamesa</i> sp.	GC							+				
钩虾属 <i>Gammarus</i> sp.	SH		+									

表2 尼木玛曲底栖动物优势物种

Tab.2 Dominant benthic animal species in Nimu Maqu

物种	优势度(Y)
同襁属 <i>Isoperla</i> sp.	0.03
四节蜉属 <i>Baetis</i> sp.	0.17
直突摇蚊属 <i>Orthocladius</i> sp.	0.09
帕摇蚊属 <i>Pagastia</i> sp.	0.06

表3 尼木玛曲底栖动物密度

Tab.3 Density of benthic animals in Nimu Maqu

点位	海拔/m	密度(ind/m ²)						总密度
		寡毛类	软体动物	EPT	其他昆虫	摇蚊科	其他类群	
NM1	3 803	0	0	3	0	5	0	8
NM2	3 927	5	4	3	21	80	2	115
NM3	3 951	0	0	8	0	0	0	8
NM4	4 028	0	0	5	7	0	0	12
NM5	4 183	0	0	3	0	10	0	13
NM6	4 266	0	0	111	15	17	0	143
NM7	4 274	0	0	71	2	10	0	83
NM8	4 276	0	0	33	3	7	0	43
NM9	4 285	10	0	15	3	3	0	31
NM10	4 584	3	0	63	0	18	0	84
NM11	5 150	7	0	3	0	128	0	138

2.2 密度和生物量

尼木玛曲底栖动物的密度和生物量见表3和表4。底栖动物密度和生物量的最大值分别出现在NM6号

(143 (ind/m²)) 和 NM8 号 (1.5312 (g/m²)) 点位, 密度最小值出现在 NM1、NM3 号点位, 均为 8 (ind/m²), 生物量最小值则在 NM5 号点位 (0.0110 (g/m²))。NM6 号点位的密度主要以 EPT 类群为主, 占总密度的 77.6%; NM8 号点位的生物量主要以 EPT 类群为主, 占总生物量的 96.8%。

表 4 尼木玛曲底栖动物生物量

Tab.4 Biomass of benthic animals in Nimu Maqu

点位	海拔/m	生物量(g/m ²)						总生物量
		寡毛类	软体动物	EPT	其他昆虫	摇蚊科	其他类群	
NM1	3803	0.000	0.000	0.165	0.000	0.023	0.000	0.188
NM2	3927	0.035	0.2068	0.032	0.600	0.375	0.007	0.3117
NM3	3951	0.000	0.000	0.458	0.000	0.000	0.000	0.458
NM4	4028	0.000	0.000	0.160	0.788	0.000	0.000	0.948
NM5	4183	0.000	0.000	0.052	0.000	0.058	0.000	0.110
NM6	4266	0.000	0.000	0.698	0.153	0.145	0.000	0.996
NM7	4274	0.000	0.000	1.567	0.578	0.103	0.000	1.248
NM8	4276	0.000	0.000	1.4818	0.462	0.032	0.000	1.5312
NM9	4285	0.070	0.000	0.243	0.022	0.003	0.000	0.338
NM10	4584	0.002	0.000	0.5340	0.047	0.000	0.000	0.589
NM11	5150	0.018	0.000	0.267	0.000	0.525	0.000	0.810

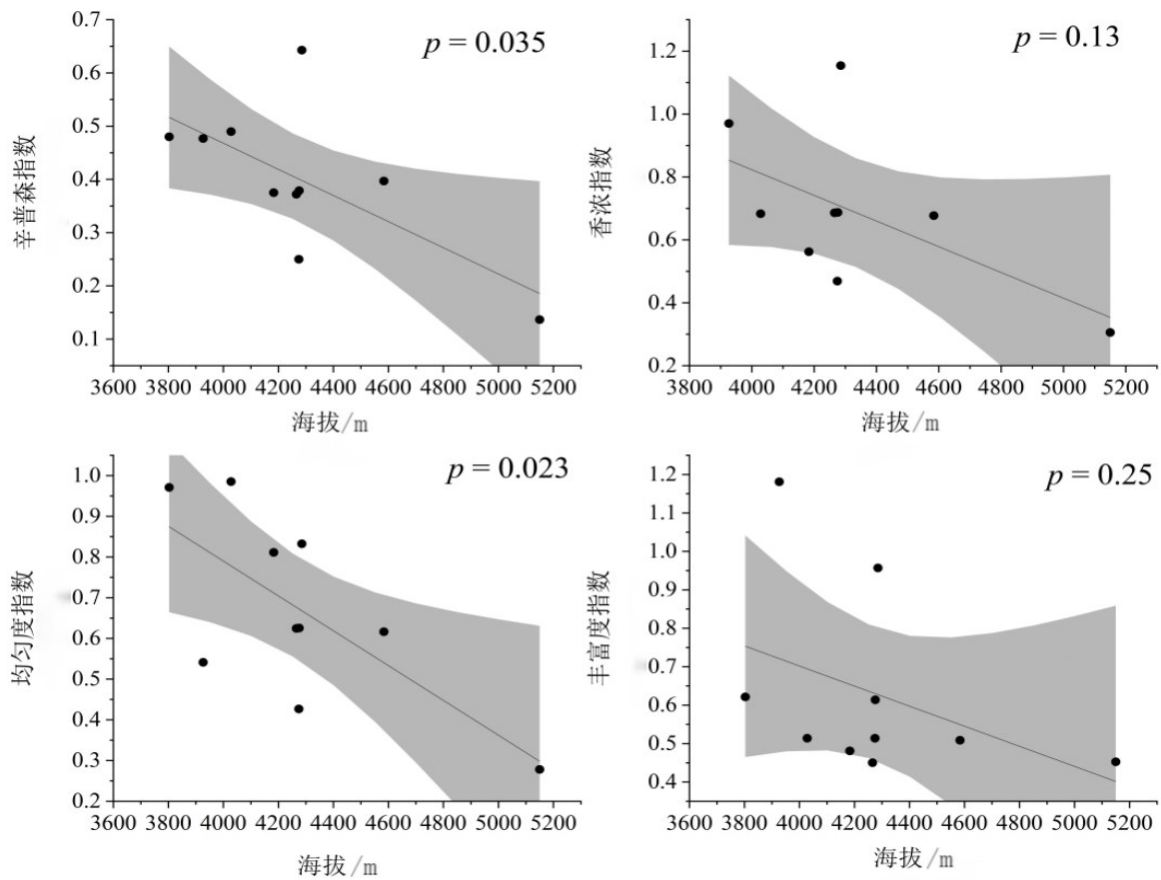


图 4 尼木玛曲底栖动物多样性指数随海拔变化

Fig.4 Variation of benthic animal diversity indices with altitude in Nimu Maqu

2.3 物种多样性分析

总体而言, 尼木玛曲底栖动物多样性指数随海拔的上升呈下降趋势(见图4)。Shannon指数的最高值出现在NM9号点位($H' = 1.15$), 最低值在NM11号点位($H' = 0.31$); Simpson指数随海拔升高呈现显著下降趋势($P < 0.05$), 最高值为NM9号点位($D = 0.64$), 最低值在NM11号点位($D = 0.14$); Pielou指数随海拔升高显著降低($P < 0.05$), NM4号点位均匀度最高($J = 0.99$), NM9号点位最低($J = 0.28$); Margalef指数显示NM2号点位物种丰富度最高($d = 1.18$), NM6号点位最低($d = 0.45$)。

3 讨论

3.1 尼木玛曲底栖动物分类群及摄食类群结构组成

尼木玛曲底栖动物主要以EPT类群为主(46%)。EPT类群通常生活在外界干扰较少、流速较快且底质为砾石的水体当中^[22], 而且大多数EPT昆虫幼虫只能生活在较清澈的水体当中, 因此常作为清洁水体的指示类群之一^[23]。研究结果表明, 尼木玛曲水质条件相对清洁。

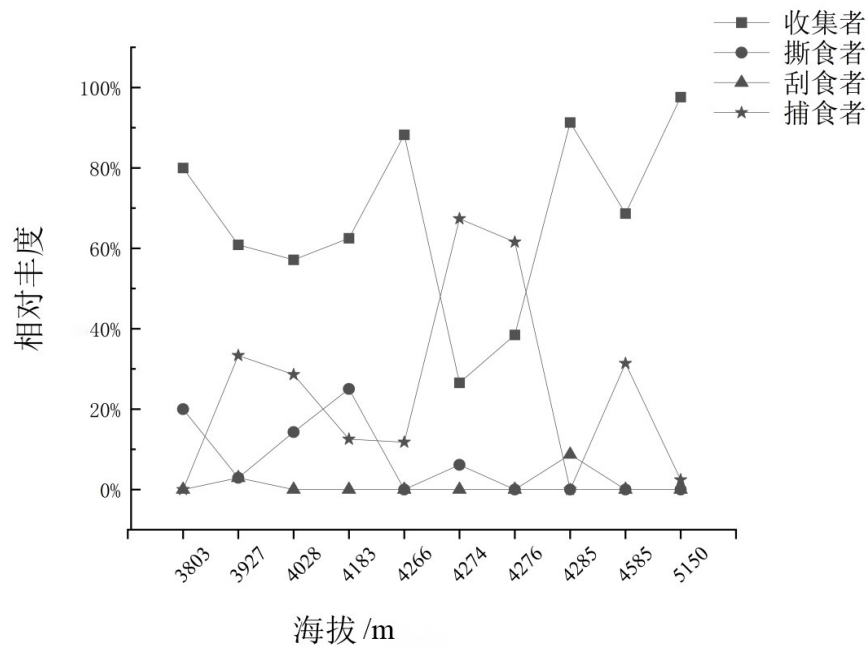


图5 尼木玛曲底栖动物功能类群相对丰度

Fig.5 The relative abundance of functional groups of benthic animals in Nimu Maqu

在自然河流生态系统中, 有机物的运输、利用和储存过程与大型底栖动物功能摄食类群的时空分布密切相关, 但外界因素的干扰可能会直接地影响其空间分布模式^[24]。经典河流连续体理论规律认为, 河流从下游到上游, 由于水动力、营养来源和底质条件的变化, 底栖动物功能摄食类群的组成也随之发生规律性变化^[24]。一般而言, 从下游至上游, 收集者相对丰度逐渐降低, 撕食者相对丰度逐渐增加, 刮食者在中游达到高峰^[25,26]。然而, 本研究结果与经典河流连续体理论存在偏差, 具体表现为: 从下游至上游, 收集者相对丰度在逐渐增加, 撕食者相对丰度逐渐降低, 而刮食者相对丰度变化不大(见图5)。这表明: 尼木玛曲与自然状态下的河流在底栖动物功能摄食类群的分布模式上存在差异。根据现场采

集情况,可能原因如下:(1)河流上游底质多为砾石和石块,为收集者提供了较为适宜的生存条件;(2)河流中下游经过城镇,外源有机物营养盐输入增加,促进了部分撕食者(如:环足摇蚊属、多足摇蚊属、大蚊属)的繁衍,导致其比例升高。

3.2 尼木玛曲大型底栖动物多样性指数

在青藏高原等高海拔地区,海拔通常会通过影响气温、水温、降水量和蒸发量等因素来调控大型底栖动物多样性^[27]尼木玛曲底栖动物的 Simpson 指数和 Pielou 指数随海拔升高呈现显著下降趋势 ($p < 0.05$),表明高海拔的大型底栖动物物种分布不均匀,群落结构更易被少数优势种主导。这可能与高海拔地区的环境异质性、物种对低温环境的适应能力因素有关^[28]。渠晓东^[28]在雅砻江锦屏段及其主要支流的研究中发现,随海拔升高,底栖动物群落的物种丰富度和均匀度有所下降,优势种趋于单一。同样, Jacobsen 等^[29]在厄瓜多尔3个不同海拔区域(低地:100~600 m;中央山谷:2 600~3 100 m;帕拉莫高地:3 500~4 000 m)的研究表明,随着海拔升高,溪流中的水温下降、初级生产力降低,导致底栖动物的丰富度和群落复杂性减少。尽管这些研究均表明海拔对底栖动物多样性有显著影响,但在高海拔地区,除了温度变化外,溶解氧浓度、底质类型、流速等环境因素也可能对底栖动物多样性发挥重要作用^[30]。因此,未来研究可结合环境变量对大型底栖动物多样性及群落结构进行深入分析,以更全面地解析海拔梯度对底栖动物多样性及群落结构的影响机制。

4 结论

通过对西藏尼木玛曲流域底栖动物生态学调查,得到如下结论:

(1)共采集底栖动物样本44种(属),主要以EPT类群为主,表明该流域整体较为清洁。在不同河段,底栖动物群落结构组成、密度、生物量以及生物多样性有明显差别。表明,底栖动物可以作为高原地区溪流生态健康的优良指标,为高原溪流生态保护与管理提供重要手段。

(2)本研究发现,该流域底栖动物摄食功能类群分布与经典河流连续体理论规律存在差异。该流域上游底质多为砾石和石块,为收集者提供了适宜的生存条件,而下游因经过城镇,外源有机物和营养盐输入增加,可能促进了部分撕食者的繁衍,导致其比例升高。结果表明,水体底质类型和人类活动对底栖动物摄食功能类群分布有重要的影响。因此,在未来水生态保护与管理中,应综合考虑水体生境特征与人为干扰对群落结构的影响,以更全面地了解河流生态系统的动态变化。

参考文献:

- [1] 李正飞,蒋小明,王军,等.雅鲁藏布江中下游底栖动物物种多样性及其影响因素[J].生物多样性,2022,30(06):123-35.
- [2] 刘思思,尚光霞,高欣,等.基于大型底栖动物生物完整性的流域水生态健康评价:以辽河流域为例[J].环境工程技术学报,2023,13(02):559-66.
- [3] 王元元,宋进喜,蒋卫威,等.摇蚊幼虫与霍甫水丝蚓扰动对河流沉积物中氮,磷,氧释放的影响[J].环境科学学报,2015,35(08):2504-11.
- [4] 杨明生.武汉市南湖大型底栖动物群落结构与生态功能的研究[D].武汉:华中农业大学,2009.
- [5] 朱晨曦,莫康乐,唐磊,等.漓江大型底栖动物功能摄食类群时空分布及生态效应[J].生态学报,2020,40(1):60-69.
- [6] Cummins K W. Structure and function of stream ecosystems[J]. BioScience, 1974, (11):631-641.
- [7] Cummins K W, Gerritsen J. Feeding Ecology of stream invertebrates [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1979,

- (10): 147-172.
- [8] Barbour M T, Gerritsen J, Stribling J B. Rapid Bioassessment Protocols for Use in Wadeable Streams and Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates, and Fish[M]. United States Environmental Protection Agency, Office of Water, 1999.
- [9] Bode R W, Novak M A, Abele L E. Quality assurance work plan for biological stream monitoring in New York State[J]. NY: NYS Department of Environmental Conservation, 2002, 1-115.
- [10] 邓冉, 邵怀勇, 黄宝荣, 等. 青藏高原生态系统完整性远程评价与国家公园群建设时序研究[J]. 生态学报, 2021, 41(03): 847-60.
- [11] 扎西拉姆, 扎西罗宗, 陈美群. 基于周丛藻类生物完整性指数评价拉萨河下游水质健康状况[J]. 高原科学研究, 2023, 7(04): 21-31.
- [12] 刘惠秋, 李晓东, 杨清, 等. 基于浮游植物完整性指数的雅鲁藏布江中上游河流水生态健康评价[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(09): 109-117.
- [13] 姜云鹏, 乔玉. 雅鲁藏布江支流流域生态特征与生物资源保护研究: 以尼木玛曲流域为例[J]. 水利水电技术, 2017, 48(10): 113-8+22.
- [14] 尼木县政府办. 尼木县自然地理[EB/OL]. (2024-03-07) [2025-03-07]. <https://www.nmx.gov.cn/nmx/zrdl/202403/d4607811f99f45bca6c6762c46241adf.shtml>.
- [15] Morse J C, Yang L, Tian L. Aquatic insects of China useful for monitoring water quality[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1994.
- [16] 王俊才, 王新华. 中国北方摇蚊幼虫[M]. 北京: 中国言实出版社, 2011.
- [17] Epler J H. Identification Manual for the Larval Chironomidae (Diptera) of North and South Carolina[M]. North Carolina Department of Environment and Natural Resources, Division of Water Quality, 2001.
- [18] 何雪宝. 西藏和四条大型河流水栖寡毛类区系研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.
- [19] 唐红渠. 中国摇蚊科幼虫生物系统学研究[D]. 天津: 南开大学, 2006.
- [20] 刘月英. 中国经济动物志: 淡水软体动物[M]. 中国经济动物志: 淡水软体动物, 1979.
- [21] 周长发, 苏翠荣, 归鸿. 中国蜉蝣概述[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [22] 徐赛赛, 刘飞, 陈诗雨, 等. 西藏柴曲藏布流域大型底栖动物群落结构与浮游生物、环境因子的相关性分析[J]. 环境科学学报, 2023, 43(08): 418-427.
- [23] 张晶. EPT动物群与水质变化的关系, F, 2005[C].
- [24] Vannote R L, Minshall G W, Cummins K W, et al. The river continuum concept - Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1980, 37(1): 130-137.
- [25] 胡本进, 杨莲芳, 王备新, 等. 闽江河1至6级支流大型底栖无脊椎动物取食功能团演变特征[J]. 应用与环境生物学报, 2005, (04): 463-6.
- [26] GRUBAUGH J W, WALLACE J B, HOUSTON E S. Production of benthic macroinvertebrate communities along a southern Appalachian river continuum [J]. Freshwater Biology, 1997, 37(3): 581-96.
- [27] 崔永德, 王宝强. 西藏湖泊底栖动物研究[M]. 西藏湖泊底栖动物研究, 2021.
- [28] 渠晓东, 曹明, 邵美玲, 等. 雅砻江(锦屏段)及其主要支流的大型底栖动物[J]. 应用生态学报, 2007, (01): 158-62.
- [29] JACOBSEN D, SCHULTZ R, ENCALADA A. Structure and diversity of stream invertebrate assemblages: the influence of temperature with altitude and latitude [J]. Freshwater Biology, 1997, 38(2): 247-61.
- [30] 邢圆, 吴小平, 欧阳珊, 等. 赣江水系大型底栖动物多样性与胁迫因子初探[J]. 生物多样性, 2019, 27(06): 648-657. 投稿时间: 2025-03-17