

绕阳河底栖动物群落结构特征研究

吕思旭

大连东软信息学院数字艺术与设计学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2026年6月6日; 录用日期: 2026年7月16日; 发布日期: 2026年7月23日

摘要

为探究绕阳河底栖动物群落结构特征,于2024年10月、2025年4月分别于秋季、春季开展底栖动物调查,在绕阳河设置采样点进行采样,采用彼得生采泥器、D型网分别采样,统计了密度、生物量及群落多样性指数等。共记录到底栖动物3门9属19种,节肢动物最多,有10种。在绕阳河底栖动物调查中,2#点秋季生物量最高,为10.45 mg/m²; 3#点秋季生物量最低,为6.17 mg/m²; 2#点春季密度最高,为26.90 ind./m²; 8#点春季密度最低,为13.45 ind./m²。绕阳河秋季底栖动物密度、生物量明显大于春季。水温、透明度、营养盐浓度等环境因子对底栖动物群落的组成和分布有较为明显的效应。由冗余分析(RDA)可知水温(WT)、总氮(TN)、总磷(TP)和透明度(SD)等环境因子都显著影响了底栖动物群落。研究可为绕阳河流域的生态保护,并为水质改善提供基础数据和科学参考。

关键词

绕阳河, 底栖动物, 群落结构, 环境因子

Characteristics of Macroinvertebrate Community Structure in the Raoyang River

Sixu Lyu

School of Digital Arts & Design, Dalian Neusoft University of Information, Dalian Liaoning

Received: June 6, 2026; accepted: July 16, 2026; published: July 23, 2026

Abstract

To investigate the community structure characteristics of macroinvertebrates in the Raoyang River, field surveys were conducted in October 2024 (autumn) and April 2025 (spring). Samples were collected at designated sampling sites using a Petersen grab sampler and a D-frame net. Parameters

including density, biomass, and community diversity indices were quantified. A total of 19 species belonging to 9 genera and 3 phyla were recorded, with Arthropoda being the most diverse group, comprising 10 species. Among the surveyed sites, Site 2# exhibited the highest autumn biomass (10.45 mg/m²), while Site 3# recorded the lowest autumn biomass (6.17 mg/m²). In spring, the highest density was observed at Site 2# (26.90 ind./m²), and the lowest at Site 8# (13.45 ind./m²). Both density and biomass of macroinvertebrates were substantially higher in autumn than in spring. Environmental factors such as water temperature, transparency, and nutrient concentrations exerted pronounced effects on the compositional and distributional patterns of the community. Redundancy analysis (RDA) indicated that water temperature (WT), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and transparency (SD) were significant environmental drivers influencing the macroinvertebrate community. This study provides foundational data and scientific reference for ecological conservation and water quality improvement in the Raoyang River basin.

Keywords

Raoyang River, Macroinvertebrates, Community Structures, Environmental Factors

Copyright © 2026 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

目前,国内外对于河流底栖动物与环境因子关系的研究已较为成熟,利用底栖动物作为生物指标评价水质和生态系统健康已成为一种有效的方法。有关大型底栖动物的研究主要集中在美国、加拿大、日本、德国、英国等发达国家。早在18世纪早期就开始了大型底栖无脊椎动物的研究,最早的研究者是英国生物学家Forbes。20世纪初,Peterson发明了采泥器,并将其用于底栖生物调查。上个世纪60年代初,国外研究学者开始使用底栖动物物种组成、丰度、生物量等指数描述底栖生物群落的特征、规律和变化。进入70年代后,Shannon-Wiener多样性指数、Margalef多样性指数、Pielou均匀度指数等指数开始用于分析大型底栖动物群落的物种多样性,从而促进了底栖动物研究的发展[1]-[4]。近年来,国外对于底栖动物的研究更加深入,例如Singh R在2021年提出一种基于机器学习的自动视觉识别方法,通过底栖动物图像实现鉴定,并且构建了一个神经网络模型,能有效区分图像中的动物物种[5]。Alves以西北伊比利亚海岸为例,探究了环境因子对底栖大型动物群落结构的影响[6]。

相比之下,中国对底栖动物的研究起步较晚,直到20世纪50年代末,政府才组织了一次对底栖生物的大规模、系统性调查,进入80年代后,国内研究学者开始利用底栖动物监测河流水体污染状况,并大量涌现了相关研究。近年来,底栖动物研究不断深入,重点集中在底栖的群落结构变化和时空分布[7]、环境因子对群落结构的影响等方面。与此同时,对于生态系统中底栖动物群落结构特征的研究,越来越多的生态学家集中于研究底栖动物与环境因子的相关性。例如金珂在研究中为了评价山西省中部地区河流水生态健康状况,于2023年10月对黄河流域、汾河流域及海河流域开展底栖动物群落调查,结合Shannon-Wiener多样性指数、BPI指数等7项生物指标评价水质,并通过冗余分析(RDA)解析环境驱动因子[8]。

2. 材料与方法

2.1. 研究区域概况

绕阳河位于辽宁省东部,是辽河流域中下游重要支流,全长约170 km,流域面积约3500 km²。根据

《辽宁省绕阳河“一河一策”治理方案》，全河落差约 150 m，河道呈典型平原河流特征，中下游河床宽度逐渐拓宽，多呈狭长带状沙底或砾沙底结构。流域地形以山地、丘陵和平原为主，海拔在 20 m~600 m 之间。气候属暖温带大陆性季风气候区，年平均气温约 9.2℃，最冷月(1 月)平均约-10℃，最热月(7 月)平均约 25℃绕阳河流域是辽宁省重要的农业产区，流域内耕地面积占总流域面积的 40%以上，主要种植玉米、水稻等作物，农业面源污染是流域主要环境问题之一。

2.2. 研究方法

2.2.1. 采样点设置

本研究于 2024 年 10 月和 2025 年 4 月对绕阳河底栖动物分别进行秋季和春季采样，沿绕阳河干流自上游至河口连续设置 1#~8#共 8 个点位(图 1，表 1)，完整覆盖上游河段、中游城镇段、下游农田湿地段、河口滨海过渡带全流程梯度。1、2#为河流上游自然河段，代表源头自然背景水环境；3#~6#：河流中游，流经村镇、农田人类活动区，捕捉面源、生活源污染输入；7、8#：河流下游近河口，衔接滨海湿地，表征河海交互前水体特征。

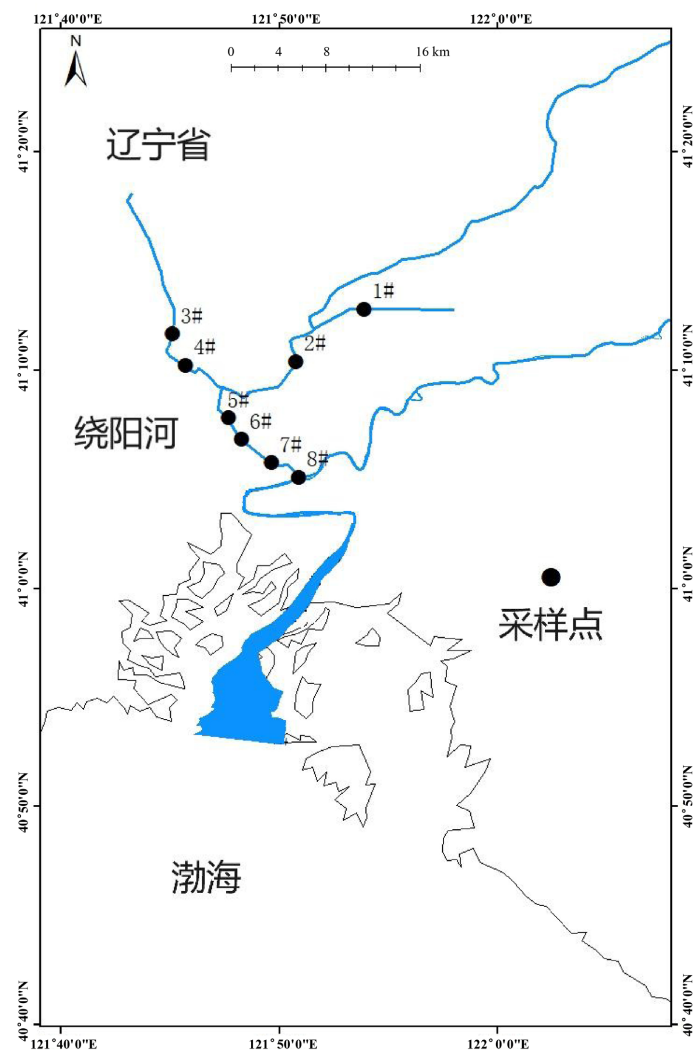


Figure 1. Distribution map of sampling points along the Raoyang River
图 1. 绕阳河采样点分布图

Table 1. Coordinates of sampling points on the Raoyang River
表 1. 绕阳河采样点坐标

采样点	坐标(东经 E, 北纬 N)
1#	121°51'59", 41°12'22"
2#	121°51'03", 41°10'19"
3#	121°45'31", 41°11'26"
4#	121°46'33", 41°10'34"
5#	121°48'32", 41°08'03"
6#	121°49'13", 41°07'07"
7#	121°50'24", 41°06'13"

2.2.2. 调查分析方法

调查方法依据《生物多样性观测技术导则 淡水底栖大型无脊椎动物》(HJ 710.8—2014)¹和《水生态监测技术要求 淡水大型底栖无脊椎动物(试行)》²进行。

底栖动物调查及分析方法：底栖动物定性样品采用彼得生采泥器(1/16 m²)，采样面积累计 0.5~2 m²。底栖动物定量样品在水深 < 1 m，徒手采样或抄网需贴底逆水采集，主要使用 D 型网(网口为 25 cm × 25 cm，网孔径为 500 μm)；水深 > 1 m，彼得生采泥器(1/16m²)进行采集。将采集到的全部收集物倒入 0.35 mm 的分样筛，流水冲洗，挑拣出活体样本立即用 75%的酒精密闭保存，带回实验室进行研究。

2.2.3. 采物种鉴定

在进行物种鉴定时，根据不同动物类群对应的检索表，结合样本的体型以及需要鉴别的特征部位，选择体式显微镜或者光学显微镜等工具来观察。主要采用外部形态特征来进行鉴定。样本鉴定到种级分类单元，难以区分的物种，会根据实际情况鉴定到属或者科的分类级别。物证鉴定方面，主要参考《辽河流域底栖动物监测图鉴》[9]和《淡水微型生物与底栖动物图谱》[10]。软体动物门的鉴定参考的是文献[9]；节肢动物门里摇蚊类幼虫的鉴定参考文献 [11]，水生昆虫类的鉴定则参考文献[12]。

2.2.4. 理化因子测定

使用 YSI6600-02 便携式水质分析仪，现场检测水体中的水温、PH 等理化指标[13]，使用流速仪测定水体流速。水样的采集和保存按照国家规定的标准(GB12999-91)进行，依据《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)的要求进行测定的水体中的总氮(TN)、总磷(TP)含量以及化学需氧量(COD_{Mn})等指标。

2.2.5. 数据处理方法

底栖动物密度(ρ):

$$\rho = N/m^2 \tag{1}$$

底栖动物生物量(B):

$$B = M/m^2 \tag{2}$$

Shannon-Weaver 多样性指数(H'):

$$H' = -\sum_{i=1}^S \left(\frac{n_i}{N} \right) \ln \left(\frac{n_i}{N} \right) \tag{3}$$

¹<https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/stzl/201411/W020141115348424763944.pdf>

²<https://www.cnemc.cn/gzdt/wjtz/202201/P020220112412621509775.pdf>

Pielou 均匀度指数(J):

$$J = \frac{H'}{\log_2 N} \quad (4)$$

以上式中, N 为所有种个体总数(ind.), M 为单位面积物种湿重(g/m²), S 为总种数(种), n_i 为第 i 种物种的个数(ind.)。

3. 结果与分析

3.1. 群落结构

绕阳河秋季和春季共采集到底栖动物 3 门 9 属 19 种, 包括节肢动物门、环节动物门和软体动物门。其中节肢动物门最多, 共 10 种, 占 52.63%; 软体动物门 5 种, 占 26.32%; 环节动物门 4 种, 占 21.05% (见图 2)。

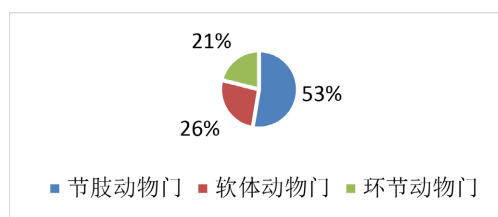


Figure 2. Composition of macroinvertebrates in the Raoyang River (total species = 19)

图 2. 绕阳河底栖动物组成(总物种数 = 19 种)

各采样点的物种数见表 2。秋季各点物种数介于 4~15 种之间, 其中 4#点种数最多(15 种), 2#点最少(4 种)。春季物种数介于 6~12 种, 6#点最多(12 种), 2#点最少(6 种)。从空间分布看, 如 4#~6#物种数高于 1#~3#和 7#、8#采样点。

Table 2. Number of macroinvertebrate species at each sampling site in the Raoyang River

表 2. 绕阳河各采样点底栖动物物种数

采样点	春季	秋季
1#	8	7
2#	6	4
3#	8	8
4#	9	15
5#	10	13
6#	12	6
7#	7	9

3.2. 密度和生物量

各采样点底栖动物密度(ind./m²)和生物量(mg/m²)见表 3。秋季时, 密度范围为 18.39~29.98 ind./m², 采样点 1#密度最大(29.98 ind./m²), 采样点 3#最小(18.39 ind./m²); 生物量范围为 6.17~10.45 mg/m², 采样点 2#最大(10.45 mg/m²), 采样点 3#最小(6.17 mg/m²)。春季各个采样点的底栖动物密度在 13.45~26.90

ind./m² 之间, 1#~5#点密度较大, 均超过了 22 ind./m²。6#~8#密度较小。8#点密度最小(13.45 ind./m²)。春季生物量整体数值小于秋季, 春季的生物量在 5.06~7.76 mg/m² 之间分布, 2#点生物量最大(7.76 mg/m²), 3#点最小(5.06 mg/m²), 各采样点生物量分布较为均匀, 大多集中在 6.3~7.3 mg/m² 之间, 春季生物量变化不大, 呈现平稳趋势, 略低于秋季。

Table 3. Density and biomass of macroinvertebrates in the Raoyang River during autumn
表 3. 绕阳河秋季底栖动物密度和生物量

采样点	秋季		春季	
	密度(ind./m ²)	生物量(mg/m ²)	密度(ind./m ²)	生物量(mg/m ²)
1#	29.98	7.77	24.29	6.39
2#	19.31	10.45	26.9	7.76
3#	18.39	6.17	22.19	5.06
4#	23.55	8.51	22.19	6.99
5#	24.65	8.84	25.53	7.26
6#	21.25	8.5	14.32	6.98
7#	20.6	8.62	13.88	7.08
8#	19.96	8.74	13.45	7.18

3.3. 生物多样性

使用香农 - 威纳指数(H')和 Pielou 均匀度(J)评估群落多样性, 结果见图 3。各采样点秋季香农指数在 1.75~2.89 间波动, 其中 1#采样点最高(2.89), 8#最低(1.75); 均匀度为 0.37~0.68, 2#采样点最高(0.68), 5#最低(0.37)。春季香农指数为 2.08~3.41, 其中 6#最高(3.41), 3#最低(2.08); 均匀度为 0.47~0.58, 最高 0.58 (4#), 最低 0.47 (8#)。可见春季多样性普遍略高于秋季, 均匀度也较为稳定。

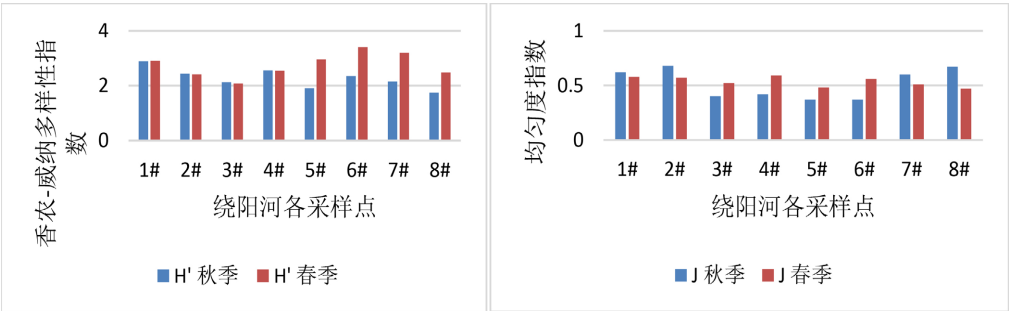


Figure 3. Biodiversity index of the Raoyang River in autumn and spring
图 3. 绕阳河秋、春季生物多样性指数

3.4. 环境因子

通过对绕阳河不同采样点的环境因子数据加以分析, 探究各个环境要素怎样影响底栖动物的多样性和群落组成, 下面就是各个环境因子对底栖动物群落结构的分析。对不同采样点环境因子(透明度 SD、温度 WT、pH、总氮 TN、总磷 TP、五日生物耗氧量 BOD₅、化学需氧量 COD_{Mn}、流速 FV)的测定结果见表 4。

Table 4. Autumn environmental factors in Raoyang River
表 4. 绕阳河秋季环境因子

季节	采样点	透明度 SD (m)	水温 WT (°C)	pH 值	总氮 TN (mg/L)	总磷 TP (mg/L)	五日生物 耗氧量 BOD ₅ (mg/L)	化学 需氧量 COD _{Mn} (mg/L)	流速 FV (m/s)
秋季	1#	0.16	14.78	7.38	0.23	0.31	4.22	0.74	0.30
	2#	0.19	17.52	7.24	0.41	0.25	3.69	0.57	0.35
	3#	0.19	17.37	7.24	0.41	0.15	5.19	0.37	0.56
	4#	0.20	17.43	7.35	0.32	0.16	7.54	0.78	0.54
	5#	0.25	15.87	7.35	0.32	0.18	4.54	0.48	0.60
	6#	0.39	15.45	7.72	0.18	0.23	6.16	0.39	0.45
	7#	0.32	15.52	7.72	0.18	0.33	5.14	0.49	0.66
	8#	0.36	15.60	7.72	0.18	0.38	4.16	0.85	0.57
春季	1#	0.45	15.50	7.35	0.41	0.40	3.74	0.67	0.25
	2#	0.51	17.25	7.33	0.23	0.45	3.27	0.35	0.44
	3#	0.54	17.32	7.72	0.28	0.48	3.64	0.38	0.41
	4#	0.60	16.40	7.72	0.13	0.14	2.94	0.48	0.53
	5#	0.67	16.45	7.78	0.18	0.36	4.34	0.88	0.45
	6#	0.15	16.60	7.21	0.29	0.24	3.68	0.33	0.52
	7#	0.63	16.74	7.26	0.84	0.36	3.38	0.29	0.55
	8#	0.42	16.80	7.29	0.27	0.42	3.28	0.75	0.48

3.5. 底栖动物与环境因子相关性分析

RDA 排序轴的特征值及解释率如表 5 所示, RDA 前两轴特征值较高(轴 1: 0.377, 轴 2: 0.122), 物种 - 环境相关系数分别为 0.915 和 0.641, 表明排序轴与环境因子组合相关性较强。前两轴累计解释物种方差的 49.9%, 解释物种 - 环境关系的 84.9%, 已能较好反映环境因子对底栖动物群落的影响。

Table 5. RDA axis correlation coefficients of macroinvertebrate vs. environmental variables
表 5. RDA 排序中底栖动物与环境因子排序轴间的相关系数

轴	特征值	物种 - 环境相关系数	物种数据累计方差解释率(%)	物种 - 环境关系累计方差解释率(%)
1	0.377	0.915	37.7	64.2
2	0.122	0.641	49.9	84.9
3	0.048	0.59	54.8	93.1
4	0.026	0.554	57.4	97.6

利用 RDA 分析(见图 4), 影响绕阳河底栖动物群落的主要环境因子有 pH 值、总氮(TN)以及流速。TN, SD 对底栖动物群落结构影响程度最高。透明度低的地方如秋季的有机物和悬浮颗粒的含量比较高, 这些物质会抑制某些敏感物种的生长, 群落均衡度下降。流速也影响底栖动物的分布, 在 2#~5#的流速高, 底栖动物的数量少。流速低的地方给底栖动物提供了更多的栖息地和食物。进一步分析表明, TN 浓

度升高与多样性指数(H')和均匀度指数(J)呈显著负相关;而SD与多样性和均匀度呈正相关,透明度越高,底栖群落越均衡。COD_{Mn}与BOD₅升高通常对应水质恶化区,表现为敏感种减少,优势种集中,群落趋向简化。通过RDA分析,本研究得出环境因子对绕阳河底栖动物群落结构起着重要作用,要保护和恢复底栖动物群落,管理措施应控制水体中氮磷浓度、提高水体透明度、调整流速,以减少水体富营养化,恢复敏感物种的栖息地,从而促进水生生态系统健康。

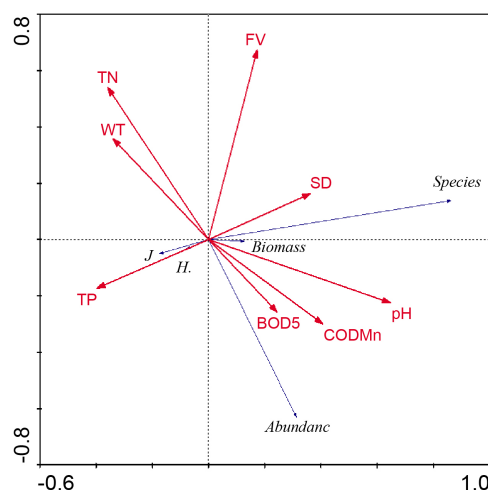


Figure 4. RDA between environmental factors and macroinvertebrates community indices

图 4. 各环境因子与底栖动物的群落结构指标之间的冗余分析(RDA)

4. 讨论

季节性变化对绕阳河底栖动物群落结构产生影响,秋季和春季底栖动物密度、生物量存在差异,秋季温度较高,水生植物生长繁茂,中游区域底栖动物群落物种丰富度和生物量较高,水温升高有利于耐温物种生长,如环节动物和部分节肢动物,温度影响底栖动物代谢速率,也通过影响水体有机物降解过程改变底栖动物食物资源,进而影响其生长和分布[14][15],春季水温适中,水温适宜,底栖动物群落恢复,生物多样性增加,在1#~3#底栖动物密度较高,与春季温度稳定和水流较低有关[16]。

环境因子是影响因素之一,透明度是水质重要指标,它与底栖动物群落结构相关联[16],秋季透明度低,这或许跟降水量增多、地表径流冲刷带来的泥沙扰动有关,这些悬浮颗粒物会减小水体光透过率,影响水生植物和浮游植物光合作用。春季透明度高,水体清澈,这给底栖动物创造了更好的生长环境,有益于水底食物供应及栖息地的供给,总氮(TN)、总磷(TP)浓度同样影响底栖动物群落[17]。高氮磷浓度是水体富营养化的标志,富营养化会引发藻类大量繁殖,进而影响水中含氧量和底栖动物栖息环境,这与孟翔等人2023年在辽河口一带的底栖动物调查研究一致[18]。秋季的2#和3#采样点总氮和总磷含量都相对较高,水质富营养化,这些高营养盐含量的地方一般会有较多细颗粒有机物和藻类。而春季的氮磷含量依旧偏高,在7#处春季富营养化现象也比较显著,底栖动物群中抗污种类所占比重大于10%。

五日生物耗氧量(BOD₅)和化学需氧量(COD_{Mn})同样对底栖动物的生境有较大影响,BOD₅和COD_{Mn}值较高一般代表水中有有机物含量较高,水中有有机物浓度较高会使得水中氧气消耗增加,不利于底栖动物的生存[19]。而在本研究中的秋季BOD₅值较高,尤其是2#和5#处,其与降下的有机污染物有关[20]。水体的春季BOD₅数值呈下降趋势,说明水体的春季有机污染物较少,有利于水中的供氧,有利于底栖动

物的生长。流速作为底栖动物影响的一个重要环境因子,在较高流速的地方,如 8#底栖动物的数量少。这是由于高流速会造成水中的泥沙重新悬浮,底栖动物栖息的空间与食物不足,而在一些低流速的采样点,例如 2#、5#,底栖动物的密度较高,这给底栖动物提供良好的栖息条件与食物来源[21]。

冗余分析(RDA)显示,总氮(TN)和透明度(SD)是底栖动物群落结构变化的关键因素,总氮(TN)浓度上升与底栖动物群落多样性存在负相关性,尤其在富营养区,敏感物种所占比例下降,透明度较低的地方常伴有有机物和悬浮颗粒物增多,会妨碍水生植物生长,进而影响底栖动物的栖息环境,流速对底栖动物分布同样有影响,流速较低处给予更多栖息空间和食物来源,利于底栖动物生长繁殖[18]。

5. 结论

绕阳河底栖动物群落共有 3 门 9 属 19 种,节肢动物占优势。生物多样性一般,秋季物种丰富度高于春季。2#采样点在生物量(10.45 mg/m²、7.76 mg/m²)与密度(19.31、26.9 ind./m²)上均为最高点,反映其局部生境条件优越;而 3#点为生物量最低(春秋均为最低),春季 8#点密度最低(13.45 ind./m²),8#区域底栖动物群落较为贫乏,受流速和污染影响较大。透明度、总氮、总磷等环境因子对底栖动物群落分布有显著影响。高营养盐浓度、低透明度的环境有利于底栖动物繁殖,但不利于水质敏感物种生长。RDA 表明,群落变化与环境因子呈显著响应关系,TN 与 H'、J 为负相关,与 SD 为正相关。TN、SD、FV、为关键影响指标。环境治理应重点关注氮磷控制与透明度恢复,优化底栖动物群落结构。管理上要控制氮磷浓度,改善水体透明度,调节流速,恢复和保护底栖动物资源。

参考文献

- [1] 邵灵丽. 吉林省密江河大型底栖无脊椎动物群落结构与环境因子关系的研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海洋大学, 2023.
- [2] 刘卫霞. 北黄海夏、冬两季大型底栖生物生态学研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [3] Voelz, N.J. and McArthur, J.V. (2000) An Exploration of Factors Influencing Lotic Insect Species Richness. *Biodiversity & Conservation*, 9, 1543-1570. <https://doi.org/10.1023/a:1008984802844>
- [4] Shannon, C.E. (1948) A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27, 379-423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- [5] Singh, R. and Mumbarekar, V. (2022) Neural Network Model Approach for Automated Benthic Animal Identification. *ICT Express*, 8, 640-645. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2021.03.003>
- [6] Alves, C.M., Gomes, M.A., Troncoso, J.S. and Gomes, P.T. (2024) Environmental Influence on the Functional Ecological Structure of Benthic Macrofaunal Communities of the Northwest Iberian Coast. *Marine Environmental Research*, 201, Article ID: 106712. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2024.106712>
- [7] 邹亮华, 邹伟, 张庆吉, 等. 鄱阳湖大型底栖动物时空演变特征及驱动因素[J]. 中国环境科学, 2021, 41(6): 2881-2892.
- [8] 金珂, 秦立鹏, 姬诚炜, 等. 山西省中部地区大型底栖动物群落结构特征与水质生物评价[J]. 湿地科学, 2025, 23(2): 385-396.
- [9] 辽宁省环境监测实验中心. 辽河流域底栖动物监测图鉴[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014: 1-213.
- [10] 周凤霞, 陈剑虹. 淡水微型生物与底栖动物图谱[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020: 1-442.
- [11] 唐红渠. 中国摇蚊科幼虫生物系统学研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 南开大学, 2006.
- [12] Morse, J.C., Yang, F.L. and Tian, L.X. (1994) Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality. Hohai University Press, 1-134.
- [13] Mise, F.T., Boëchat, I.G. and Gücker, B. (2020) Responses of Aquatic Macroinvertebrates to Multiple Stressors in Urban Streams: The Role of Physical Habitat and Water Quality. *Science of the Total Environment*, 737, Article ID: 139456.
- [14] Bonacina, L., Fasano, F., Mezzanotte, V. and Fornaroli, R. (2023) Effects of Water Temperature on Freshwater Macroinvertebrates: A Systematic Review. *Biological Reviews*, 98, 191-221. <https://doi.org/10.1111/brv.12903>
- [15] Ge, J., Chen, J., Zi, F., Song, T., Hu, L., He, Z., et al. (2025) Seasonal Variations in Macroinvertebrates Communities and

- Their Relationship with Environmental Factors in the Alpine Yuqu River. *Biology*, **14**, Article No. 120. <https://doi.org/10.3390/biology14020120>
- [16] Fu, X., Yang, W., Zheng, L., Liu, D. and Li, X. (2022) Spatial Patterns of Macrobenthos Taxonomic and Functional Diversity throughout the Ecotones from River to Lake: A Case Study in Northern China. *Frontiers in Ecology and Evolution*, **10**, Article ID: 922539. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.922539>
- [17] 李婧婷. 雅鲁藏布江大型底栖无脊椎动物多样性分异的流域驱动因子[D]: [硕士学位论文]. 拉萨: 西藏大学, 2024.
- [18] 孟翔, 袁秀堂, 张安国, 等. 辽河口潮间带大型底栖动物摄食功能群特征研究[J]. 海洋科学, 2023, 47(7): 111-121.
- [19] Peng, K., Dong, R., Qin, B., Cai, Y., Deng, J. and Gong, Z. (2023) Macroinvertebrate Response to Internal Nutrient Loading Increases in Shallow Eutrophic Lakes. *Biology*, **12**, Article No. 1247. <https://doi.org/10.3390/biology12091247>
- [20] Li, P., Xiong, S., Liu, J., Wang, T., Liu, Y., Liu, K., *et al.* (2024) The Spatiotemporal Variation and Ecological Evaluation of Macroinvertebrate Functional Feeding Groups in the Upper Yellow River. *Biology*, **13**, Article No. 791. <https://doi.org/10.3390/biology13100791>
- [21] 商淋友, 刘曼红, 周春来, 等. 小兴凯湖大型底栖动物生物多样性研究[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2025, 57(1): 107-117.