

doi: 10.7541/2023.2022.0034

海河流域拒马河鱼类群落结构特征及其与环境因子的关系

王 孟 王银肖 谭慧敏 王 敏 穆淑梅 康现江 陈咏霞

(河北大学生命科学与绿色发展研究院, 保定 071002)

摘要: 为了解拒马河鱼类时空分布及影响因子, 基于2019—2021在拒马河的6次季节性鱼类调查, 分析了拒马河鱼类群落结构及其与环境因子的关系。结果显示: 共采集37种鱼类, 隶属5目11科, 鲤形目最多, 占总种数的64.86%。相对重要指数(Index of relative importance, IRI)显示, $IRI \geq 500$ 的优势种鱼类有10种, 以鲫*Carassius auratus* Linnaeus、麦穗鱼*Pseudorasbora parva* Temminck & Schlegel、黑鳍鳊*Sarcohilichthys nigripinnis* Günther和宽鳍鳊*Zacco platypus* Temminck & Schlegel为主。单因素方差分析(ANOVA)表明, 春、夏、秋季鱼类群落的个体数(N)、物种数(S)、Shannon-Wiener多样性指数(H')和Margalef丰富度指数(D_{Ma})存在显著差异, Pielou均匀度指数(J')无显著差异。SNK多重比较检验(Student-Newman-Keuls)显示个体数、种类数以2019年5月(春季)最多, Shannon-Wiener多样性指数、Margalef丰富度指数以2019年8月(夏季)最高。等级聚类分析(Cluster)和非参数多变量排序(NMDS)分析显示, 拒马河鱼类群落在空间上分为3组, 上游S1拒马河源头和S2刁江汇为组 I, 中游S3紫荆关大桥和S4清凉涧为组 II, 中下游自S5小丰口桥至S15龙安大桥为组 III。丰度生物量比较曲线(ABC曲线)分析显示, 2020年夏季鱼类群落结构稳定未受干扰($W=0.064$), 其余月份均受中度干扰($W < -0.007$)。冗余分析(RDA)显示, 海拔、水温和pH为影响拒马河鱼类群落结构时空变化的主要环境因子。研究可为拒马河鱼类资源保护和生态修复提供依据。

关键词: 鱼类群落; 结构特征; 多样性; 丰富度; 环境因子; 拒马河

中图分类号: S932.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2023)05-0836-15



拒马河原名涑水河, 是海河流域大清河北部支流, 发源于河北省涑源县西北太行山麓, 流经紫荆关向北至涑水县折向东流, 至北京市张坊镇分为南、北二支, 南拒马河目前已经干涸消亡, 北拒马河于白沟镇流入大清河, 拒马河干流长254 km, 张坊镇以上流域面积5115 km², 是中国北方最大的冬季不结冰河流^[1-4]。拒马河流域地貌复杂, 不同河段气候与环境相差悬殊, 生境的多样性造就了丰富的水生生物资源, 是华北地区内陆水域生物多样性的的重要组成部分, 具有极高的科研及保护价值^[5, 6]。

河流及湖泊水文环境的改变影响其中鱼类群落的结构组成, 而鱼类群落的结构组成也是水生生态系统健康的重要指标, 可通过鱼类群落的变动来分析水环境状况的受污染程度^[7, 8]。近年来, 拒马河生态环境发生了巨大变化, 生态流量逐年下降,

水生态环境受人类影响较大^[5], 水质、水文流通性发生改变, 改变了生活在其中的鱼类的栖息环境, 增加了鱼类的生存压力^[9]。拒马河拦河坝的建设导致河流片段化严重, 纵向连通几乎丧失, 鱼类洄游通道被阻断, 部分河段形成小型静水湖泊, 洄游性、亲流性和因拦河坝建设而失去栖息及越冬场所的鱼类减少而喜静水性鱼类增加^[10, 11]。加深鱼类群落在空间和时间上对生境改变做出反应的认知对制定有效的生态环境保护策略非常重要^[12], 国内关于鱼类群落与环境因子的关系的研究多集中于近海和河口, 对于内陆河流的研究较为匮乏^[13-15]。目前, 拒马河鱼类资源的调查虽有不少资料, 但了解得仍然不够深入和系统, 多仅限于北京段, 如2008年杨文波等^[16]对拒马河北京段的鱼类资源调查, 记录鱼类24种; 张春光等^[17]在《北京及其邻近

收稿日期: 2022-01-24; 修订日期: 2022-06-01

基金项目: 河北省自然科学基金(C2016201055); 白洋淀水生生物资源调查及水域生态修复示范项目(2130135)资助 [Supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province (C2016201055); Baiyangdian Aquatic Biological Resources Survey and Water Ecological Restoration Demonstration Project (2130135)]

作者简介: 王孟(1999—), 男, 硕士研究生; 主要从事水生生物学方面研究。E-mail: 2669812931@qq.com

通信作者: 陈咏霞, E-mail: chen Yongxia@hbu.edu.cn

地区的鱼类》中整理历史资料,记录拒马河历史上出现鱼类42种;袁立来等^[6]利用鱼类生物完整性指数对拒马河北京段进行了河流健康评价,发现拒马河北京段河流健康整体处于较差水平。对拒马河上游区域的物种组成和地理分布等基本问题仍缺乏准确的数据,因此,系统开展拒马河鱼类资源调查,以掌握拒马河鱼类时空分布及影响因子,是拒马河鱼类资源开发利用和资源保护首要解决的问题。

本研究基于2019—2021年间6次拒马河鱼类资源调查数据,从物种组成、优势种及群落结构特征等方面分析了鱼类群落结构现状,并讨论了鱼类资源的时空分布与环境因子的关系,为拒马河流域内的鱼类资源的保护、修复和管理提供理论基础和科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本次调查范围自涞源县拒马河源头至张坊镇龙安大桥,采样点的选择参考《内陆水域渔业自然资源调查规范》^[18],综合考虑拒马河河流特点及采样点的代表性,设置了15个采样点,采样点的经纬度和位置见表1和图1。于2019年5月(春季)、8月(夏季)、10月(秋季),2020年8月、10月和2021年5月进行采样调查,每个采样点设置两条多目刺网和地笼,刺网规格20 m×1 m和25 m×1.5 m,网目为

表 1 拒马河采样点分布

Tab. 1 Distribution of sampling stations in the Juma River

采样点 Sampling station	编号 Serial number	经度 Longitude	纬度 Latitude
拒马河源头 The source of Juma River	S1	114°45'04.115"	39°19'57.115"
刁江汇 Diaojianghui	S2	115°01'36.775"	39°25'39.702"
紫荆关大桥 Zijingguan Bridge	S3	115°10'03.338"	39°25'41.776"
清凉涧 Qingliangjian	S4	115°15'38.952"	39°37'44.969"
小丰口桥 Xiaofengkou Bridge	S5	115°20'35.686"	39°42'05.548"
别岸 Bie'an	S6	115°27'38.115"	39°39'06.187"
琅琊河 Langya River	S7	115°29'18.773"	39°39'08.849"
天花板 Tianhuaban	S8	115°30'40.557"	39°39'47.696"
北石门 Beishimen	S9	115°32'44.611"	39°38'33.555"
西河口 Xihekou	S10	115°34'09.356"	39°38'27.367"
九渡Jiudu	S11	115°35'22.049"	39°37'41.080"
六渡Liudu	S12	115°37'59.485"	39°38'19.132"
穆家口 Mujiakou	S13	115°39'48.970"	39°37'43.089"
千河口 Qianhekou	S14	115°39'57.071"	39°36'38.520"
龙安大桥 Longan Bridge	S15	115°41'14.921"	39°34'32.855"

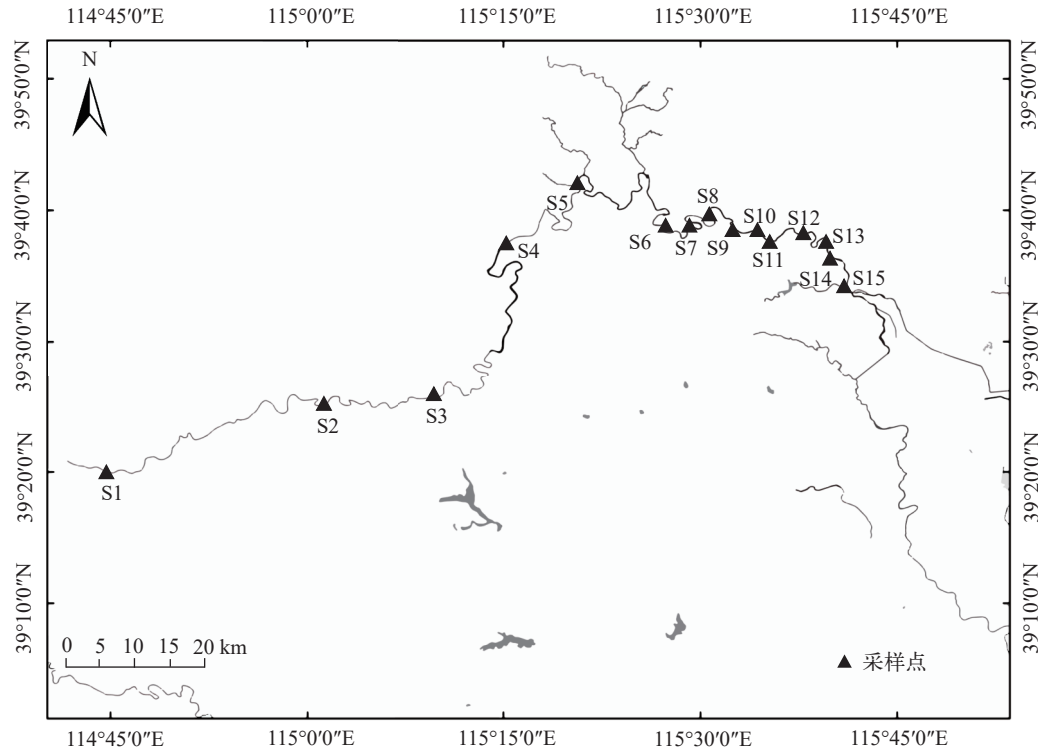


图 1 拒马河采样点示意图

Fig. 1 Map showing the sampling stations in the Juma River

3和5 cm, 地笼规格为10 m×35 cm×30 cm和10 m×25 cm×20 cm, 网目为1 cm。刺网和地笼于16:00—18:00时下网, 次日5:00—7:00起网, 放置时间约12h。依据最新鱼类学专著对采集的渔获物分类^[19-21], 对新鲜鱼类样本现场进行物种鉴定和个体测量, 采用游标卡尺和电子天平测量体长(精确到1 mm)和体重(精确到0.1 g)数据, 现场无法鉴定的个体用95%的酒精保存后带回实验室进一步分类鉴定。

对鱼类资源调查的同时, 对15个采样点进行海拔(ASL)、水温(Tem)、水深(Dep)、溶解氧(DO)、透明度(SD)、浊度(FNU)、pH和叶绿素 a (Chl. a)等环境因子的测定(水科院, 未发表数据)。

1.2 数据处理分析

采用以下多样性指数来分析拒马河鱼类群落多样性: (1)Margalef丰富度指数(D_{Ma})^[22]: $D_{Ma} = (S-1)/\ln N$; (2)Shannon-Wiener多样性指数(H')^[23]: $H' = -\sum P_i \times \ln P_i$; (3)Pielou均匀度指数(J')^[24]: $J' = H'/\ln S$ 。式中, S 为采集到的鱼类种类数, N 为采集到鱼类的个体数, P_i 为样品中第 i 种鱼类的个体数占渔获物中全部个体数的比例。选择Pinkas等^[25]提出的相对重要指数(Index of relative importance, IRI)计算拒马河鱼类群落优势种: $IRI = (N_i + W_i) F_i$ 。式中, N_i 为渔获物中第 i 种鱼类的个体数占渔获物总个体数的百分比, W_i 为第 i 种鱼类的生物量占渔获物总生物量的百分比, F_i 为第 i 种鱼类在采样点出现的频率。定义 $IRI \geq 500$ 的为优势种, $100 \leq IRI < 500$ 的为重要种, $10 \leq IRI < 100$ 的为常见种, $1 \leq IRI < 10$ 的为一般种, $IRI < 1$ 的为稀有种^[26]。

采用丰度生物量比较曲线(Abundance-biomass comparison curves, ABC曲线)^[27]判断鱼类群落稳定性及受干扰程度, ABC曲线的统计量用 W 表示, 当生物量优势度曲线位于丰度优势度曲线之上时, W 为正, 表明群落结构稳定未受干扰, 反之 W 为负^[28]: $W = \sum (B_i - A_i) / 50(S-1)$ 。式中, A_i 为第 i 种鱼类相对应的丰度累积百分比, B_i 为第 i 种鱼类相对应的生物量累积百分比, S 为物种数。

为满足数据的正态齐性和方差齐性, 分析前对鱼类丰度数据及多样性数据进行 $\lg(x+1)$ 对数转换, 运用SPSS 25.0通过单因素方差分析(One-way ANOVA)检验不同季节、海拔鱼类丰度及多样性的差异。若存在显著性差异, 进一步使用SNK(Student-newman-Keuls)多重比较分析不同季节、海拔间鱼类丰度及多样性的变化^[33]。

在Primer 5.0软件中, 以采集到的鱼类丰度数据为原始矩阵, 进行 $\lg(x+1)$ 对数转换, 运用等级聚类分析(Cluster)和非参数多变量排序(NMDS)将鱼类

群落划分不同的组分。运用相似性百分比分析(Similarity percentages, SIMPER)确定维持不同组分间结构相似性的关键物种^[29]。

利用Canoco 5.0软件对15个采样点的鱼类物种组成和环境因子进行去趋势对应分析(Detrended correspondence analysis, DCA), 根据分析结果中各排序轴的大小选择线性模型(Redundancy analysis, RDA)或单峰模型(Canonical correspondence analysis, CCA)分析鱼类物种和环境因子的相关性^[30]。如果排序轴大于4选择CCA分析, 排序轴小于3选择RDA分析, 介于3和4之间, 两种分析方法均可。

2 结果

2.1 拒马河鱼类组成及优势种

2019—2021年在拒马河共采集鱼类5486尾, 隶属5目11科37种(表2)。渔获物中鲤形目占绝对优势, 有3科24种, 占总种数的64.86%; 鲈形目3科6种, 占16.22%; 鲇形目2科4种, 占10.81%; 合鳃鱼目2科2种, 占5.41%; 颌针鱼目1科1种, 占2.70%。

鱼类生态类型(表2): 按生活习性可以将采集到的鱼类划分为亲流性鱼类(R)和喜缓流或静水性鱼类(S), 其中亲流性鱼类有20种, 占采集到的鱼类总种数的54.05%, 喜缓流或静水性鱼类有17种, 占总种数的45.95%; 按食性可以划分为杂食性鱼类(Omn)和肉食性鱼类(Car), 杂食性鱼类有25种, 占总种数的67.57%, 肉食性鱼类有12种, 占总种数的32.43%; 按不同栖息水层划分, 底栖鱼类(De)有23种, 占62.16%, 中下层鱼类(Lo)有8种, 占21.62%, 中上层鱼类(Up)有6种, 占16.22%; 按产卵类型划分, 产漂流性卵的鱼类(Dr)有16种, 占43.24%, 产沉性卵的鱼类(D)有11种, 占29.73%, 产黏性卵的鱼类(V)6种, 占16.22%, 喜贝类性产卵的鱼类(Sp)4种, 占10.81%。

以相对重要指数 $IRI \geq 500$ 的为优势种, 在6次采样调查中, 拒马河优势种有10种, 重要种有12种, 主要种有8种, 一般种有7种。各月份优势种存在差异, 2019年5月优势种为尖头鲮*Rhynchocypris oxycephalus* Sauvage、宽鳍鱮*Zacco platypus* Temminck & Schlegel、麦穗鱼*Pseudorasbora parva* Temminck & Schlegel、点纹银鲈*Squalidus wolterstorffi* Regan、黑鳍鳉*Sarcocheilichthys nigripinnis* Günther、泥鳅*Misgurnus anguillicaudatus* Cantor、小黄鲈鱼*Micropercops swinhonis* Günther; 2019年8月优势种为鲫*Carassius auratus* Linnaeus、麦穗鱼、黑鳍鳉、泥鳅、黄颡鱼*Tachysurus fulvidraco* Richardson; 2019年10月优势种为麦穗鱼、小黄鲈鱼; 2020年8月优势种为鲫、宽鳍鱮、麦穗鱼、黑

表 2 拒马河鱼类组成、各月份相对重要指数(IRI)及生态类型

Tab. 2 The fish composition, index of relative important (IRI) of each month and ecological types in the Juma River

物种Species	相对重要指数IRI						生态类型
	2019.5	2019.8	2019.10	2020.8	2020.10	2021.5	Ecological types
鲤形目Cypriniformes							
鲤科Cyprinidae							
鲤亚科Cyprininae							
鲫 <i>Carassius auratus</i>	209.63	3024.43	371.53	1050.27	245.62	273.74	S, Omn, De, V
鲮亚科Acheilognathinae							
兴凯鲮 <i>Acheilognathus chankaensis</i>	8.36	—	—	—	—	—	S, Omn, U, Sp
中华鲮 <i>Rhodeus sinensis</i>	8.08	—	—	3.87	—	—	S, Omn, U, Sp
高体鲮 <i>Rhodeus ocellatus</i>	39.02	148.43	—	62.34	—	4.60	S, Omn, U, Sp
雅罗鱼亚科Leuciscinae							
尖头鲮 <i>Rhynchocypris oxycephalus</i>	668.20	216.15	101.76	476.61	44.59	90.97	R, Omn, Lo, Dr
拉氏鲮 <i>Rhynchocypris lagowskii</i>	317.45	10.61	450.36	54.01	215.97	108.09	R, Omn, Lo, Dr
鲴亚科Danioninae							
宽鳍鲴 <i>Zacco platypus</i>	1928.30	494.22	282.76	2497.27	1558.08	413.94	R, Omn, U, D
马口鱼 <i>Opsariichthys bidens</i>	5.48	4.53	14.86	235.48	—	—	R, Car, U, D
鲃亚科Gobioninae							
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	2291.93	3463.52	1546.54	2742.93	2605.65	5382.96	S, Omn, De, V
点纹银鲃 <i>Squalidus wolterstorffi</i>	1162.26	121.92	24.68	92.90	1.49	22.05	S, Omn, Lo, Dr
中间银鲃 <i>Squalidus intermedius</i>	—	53.15	—	34.37	—	—	R, Omn, Lo, Dr
兴隆山小鲃 <i>Microphysogobio hsinglungshanensis</i>	217.79	53.69	29.31	—	12.42	369.75	R, Omn, Lo, Dr
黑鳍鲃 <i>Sarcohilichthys nigripinnis</i>	548.01	622.04	198.44	685.56	383.17	884.47	S, Omn, Lo, Sp
棒花鲃 <i>Gobio rivuloides</i>	1.47	183.58	—	—	—	7.15	R, Omn, De, V
棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	263.72	38.68	385.70	275.44	532.21	—	R, Omn, De, V
蛇鲃 <i>Saurogobio dabryi</i>	0.82	1.83	26.13	40.43	337.43	46.09	R, Omn, Lo, Dr
花鲃科Cobitidae							
泥鲃 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	1044.35	580.91	55.37	41.34	16.14	50.20	S, Omn, De, Dr
北方泥鲃 <i>Misgurnus bipartitus</i>	—	1.77	—	—	—	—	R, Omn, De, Dr
大鳞副泥鲃 <i>Paramisgurnus dabryanus</i>	109.14	144.85	19.20	53.78	21.18	12.62	S, Omn, De, Dr
花斑花鲃 <i>Cobitis melanoleuca</i>	95.38	115.57	—	12.07	1.72	71.63	S, Omn, De, Dr
条鲃科Nemacheilidae							
北鲃 <i>Lefua costata</i>	—	—	—	—	2.28	1.41	R, Omn, De, Dr
赛丽高原鲃 <i>Triplophysa sellaefer</i>	11.33	—	5.83	—	104.93	37.93	R, Omn, De, Dr
尖头高原鲃 <i>Triplophysa Cuneicephala</i>	—	—	2.16	—	—	—	R, Omn, De, Dr
达里湖高原鲃 <i>Triplophysa dalaica</i>	97.01	12.11	80.15	—	168.26	127.34	R, Omn, De, Dr
合鳃鱼目Symbranchiformes							
刺鲃科Mastacembelidae							
刺鲃 <i>Sinobdella sinensis</i>	50.12	26.09	—	59.92	—	2.85	S, Car, De, D
合鳃鱼科Symbranchidae							
黄鲢 <i>Monopterus albus</i>	12.24	—	—	—	—	—	S, Car, De, Dr
鲈形目Percoidei							
鰕虎鱼科Gobiidae							
子陵吻鰕虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	2.65	8.25	4.56	53.91	38.20	5.10	R, Car, De, D
林氏吻鰕虎鱼 <i>Rhinogobius lindbergi</i>	68.08	19.58	9.97	—	0.01	26.13	R, Car, De, D
波氏吻鰕虎鱼 <i>Rhinogobius cliffordpopei</i>	44.63	0.96	1.70	—	1.31	—	R, Car, De, D
福岛吻鰕虎鱼 <i>Rhinogobius fukushimai</i>	30.47	0.63	0.43	1.83	—	2.40	R, Car, De, D

续表 2

物种Species	相对重要指数IRI						生态类型
	2019.5	2019.8	2019.10	2020.8	2020.10	2021.5	Ecological types
沙塘鳢科Odontobuidae							
小黄鲈鱼 <i>Micropercops swinhonis</i>	1250.14	308.40	786.30	453.05	386.69	663.59	S, Omn, De, D
丝足鲈科Osphronemidae							
圆尾斗鱼 <i>Macropodus chinensis</i>	1.40	—	0.44	0.98	1.42	2.62	S, Car, Lo, Dr
鲇形目Siluriformes							
鲿科Bagridae							
黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	313.28	861.57	449.50	1265.35	191.14	10.27	S, Car, De, D
瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachellii</i>	7.92	37.05	0.58	—	9.54	—	R, Car, De, D
乌苏里黄颡鱼 <i>Pelteobagrus ussuriensis</i>	—	287.03	—	37.59	—	20.41	R, Car, De, D
鲇科Siluridae							
鲇 <i>Silurus asotus</i>	10.83	203.88	198.89	26.22	—	—	S, Car, De, V
颌针鱼目Beloniformes							
青鳉科Adrianichthyidae							
青鳉 <i>Oryzias sinensis</i>	—	1.13	—	—	—	—	S, Omn, U, V

注: S. 喜缓流或静水; R. 亲流性; Car. 肉食性; Omn. 杂食性; U. 中上层; Lo. 中下层; De. 底栖。V. 黏性卵; D. 沉性卵; Dr. 漂流性卵; Sp. 喜贝类性卵

Note: S. slow flow; R. riffle; Car. carnivore; Omn. omnivore; U. upper; Lo. lower; De. demersal; V. viscid egg; D. demersal egg; Dr. drifting egg; Sp. spawning in shellfish

鳊、黄颡鱼; 2020年10月优势种为宽鳍鱮、麦穗鱼、棒花鱼*Abbottina rivularis* Basilewsky; 2021年5月优势种为麦穗鱼、黑鳍鳊、小黄鲈鱼。麦穗鱼在6次采样调查中均作为优势种出现。

2.2 拒马河鱼类群落特征

单因素方差分析显示(表 3), 不同季节间个体数(N)、物种数(S)、Shannon-Wiener多样性指数(H')、Margalef丰富度指数(D_{Ma})呈现显著性差异($P < 0.05$), Pielou均匀度指数(J')无显著性差异($P > 0.05$)。SNK多重比较分析显示, 物种数、个体数均以2019年5月最多, 15个采样点平均捕获鱼类91.00尾9.67种, 2021年10月最少, 平均38.73尾5.07种; Shannon-Wiener多样性指数(H')、Margalef丰富度指数(D_{Ma})均以2019年8月份最高, 分别是1.76(1.09—2.20)和2.06(1.12—2.98)。2019—2021年调查显示拒马河夏季的Shannon-Wiener多样性指数(H')、Margalef丰富度指数(D_{Ma})和Pielou均匀度指数(J')均值高于春、秋两季(图 2)。

物种数(S)、Shannon-Wiener多样性指数(H')、Margalef丰富度指数(D_{Ma})、Pielou均匀度指数(J')在不同海拔无显著性差异($P > 0.05$), 只有个体数(N)呈现显著性差异($P < 0.05$), 海拔高于500 m的位点平均可采集鱼类143.91尾, 海拔低于500 m的位点可采集48.19尾(图 2)。

NMDS排序分析和聚类分析结果一致, 拒马河鱼类群落自上游至下游可划分为3组, 即S1和S2为组 I, S3和S4为组 II, 其余采样点为组III(图 3)。相

似性百分比分析SIMPER(表 4)显示, 组 I 平均相似度为51.01%, 主要贡献种有麦穗鱼、鲫、小黄鲈鱼、泥鳅、拉氏鲮*Rhynchocypris lagowskii* Dybowski、赛丽高原鳅*Triplophysa sellaefer* Nichols、尖头鲮、达里湖高原鳅*Triplophysa dalaica* Kessler和林氏吻鰕虎鱼*Rhinogobius lindbergi* Berg, 累积贡献度为90.07%; 组 II 平均相似度为66.92%, 主要贡献种有麦穗鱼、小黄鲈鱼、棒花鱼、黄颡鱼、鲫、子陵吻鰕虎鱼*Rhinogobius giurinus* Rutter、中间银鲃*Squalidus intermedius* Nichols和林氏吻鰕虎鱼, 累积贡献度为90.16%; 组 III 平均相似度为61.00%, 主要贡献种有麦穗鱼、宽鳍鱮、小黄鲈鱼、黑鳍鳊、鲫、黄颡鱼、泥鳅、棒花鱼、高体鲫*Rhodeus ocellatus* Kner、兴隆山小鰕鲃*Microphysogobio hsinglungshanensis* Mori、点纹银鲃、刺鲃*Sinobdella sinensis* Bleeker和棒花鲃*Gobio rivuloides* Nichols, 累积贡献度为91.23%。

2.3 丰度生物量比较曲线

鱼类群落的优势度曲线变化趋势(图 4)显示, 2020年8月拒马河鱼类群落的生物量优势度曲线位于丰度优势度曲线之上, 统计值 $W > 0$, 表示该月份鱼类群落结构稳定未受干扰, 其余月份的丰度累积百分比与生物量累积百分比的大小交错分布, ABC曲线中丰度优势度曲线与生物量优势度曲线相交, 统计量 $W < 0$, 鱼类群落受到中等程度干扰。2020年夏季数量优势度曲线和丰度优势度曲线均排在前5位的优势种类为麦穗鱼、宽鳍鱮和尖头鲮, 该季

度所采集渔获物中, 平均个体生物量为8.99 g, 平均个体生物量最大的是黄颡鱼, 为30.86 g, 平均个体生物量最小的是福岛吻虾虎鱼*Rhinogobius fukushi-mai* Mori, 为0.50 g。

2.4 拒马河鱼类群落结构与环境因子的关系

DCA排序结果显示四个排序轴长度均小于3(表5), 其中一、二轴长分别为2.84和2.28, 累积解释物种变化率为13.74%和22.72%, 物种和环境与排序轴相关性为94.14%、87.37%, 拒马河鱼类群落参数对环境因子的响应呈线性关系, 因此拒马河鱼类群落与环境因子分析适用于RDA分析。

RDA分析中第一轴和第二轴为主成分轴(表6), 第一轴解释变化率为21.73%, 前两轴累计解释变化率为29.03%, 物种和环境同前两轴相关关系分别为94.66%和81.29%。拒马河鱼类群落与环境因子

RDA排序图结果(图5)显示, 影响拒马河鱼类群落结构组成影响最大的环境变量为海拔(ASL), 对主要种类的解釋量为20.60%, 是显著影响因子(蒙特卡洛检验 $F=8.8, P=0.002$), 海拔与pH(蒙特卡洛检验 $F=0.2, P=0.024$)同第一轴的相关性较强。海拔对尖头高原鳅*Triplophysa Cuneicephala* Shaw & Tchang、达里湖高原鳅、尖头鲢、拉氏鲢、马口鱼*Opsariichthys bidens* Günther、蛇鮈*Saurogobio dabryi* Bleeker、棒花鱼等影响较大。黑鳍鳈、刺鳅、瓦氏黄颡鱼*Pelteobagrus vachellii* Richardson等对pH的变化呈负相关, 而兴凯鲌*Acanthorhodeus chankaensis* Dybowski对pH的变化呈正相关。水温(蒙特卡洛检验 $F=2.8, P=0.008$)与第二轴相关性较强, 对鲫、高体鳊和乌苏里黄颡鱼*Pelteobagrus ussuriensis* Dybowski等的影响较大。

表3 基于单因素方差分析检验(F值)拒马河鱼类多样性指数不同季节、不同海拔的变化

Tab. 3 Changes of fish diversity index in different seasons and different altitudes in the Juma River based on One-way ANOVA test (F value)

项目Item	个体数 Number of individuals (N)	物种数 Number of species (S)	多样性指数 Shannon-Wiener diversity (H')	均匀度指数 Pielou evenness (J')	丰富度指数 Margalef richness (D _{ma})
季节Season	2.935*	7.986**	6.504**	1.022 ^{ns}	4.9**
海拔Altitude	12.206**	0.122 ^{ns}	1.616 ^{ns}	7.368 ^{ns}	3.765 ^{ns}

注: ns、*和**分别代表 $P>0.05$ 、 $P<0.05$ 、和 $P<0.01$
Note: ns, * and ** represent $P>0.05$, $P<0.05$ and $P<0.01$

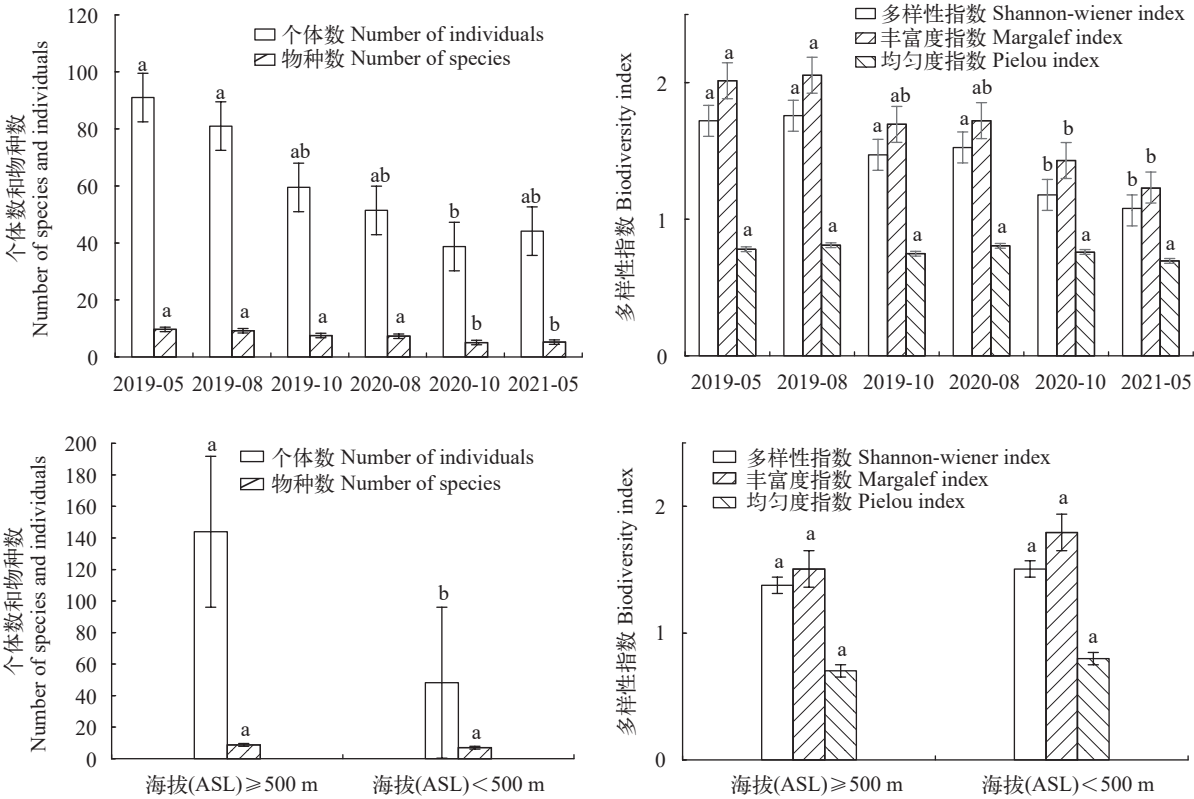


图2 拒马河鱼类多样性指数在不同季节、不同海拔差异

Fig. 2 Differences of fish diversity index in different seasons and different altitudes in the Juma River

3 讨论

3.1 拒马河鱼类群落组成结构特征

拒马河位于太行山迎风区北部,北连西北山间盆地和北京西山地区,西部以山西省为邻,南部与大清河南支山区相接^[31],根据李国良^[32]对河北淡水鱼类地理区系的划分,拒马河流域大部分属于冀西山地区,海拔高度由500 m增至1000 m以上,鱼类资源以条鳅科(赛丽高原鳅、达里湖高原鳅)、花鳅科(北方泥鳅*Misgurnus bipartitus* Dybowski、泥鳅)和

鲤科中的雅罗鱼亚科(尖头鲮、拉氏鲮、马口鱼、宽鳍鲮)、鮡亚科(麦穗鱼、点纹银鮡、中间银鮡)、鲃亚科(多鳞铲颌鱼*Onychostoma macrolepis* Bleeker)鱼类为主。根据历史记载,拒马河鱼类资源并不丰富,李国良^[33]和王所安^[20]记录了9种,杨文波等^[16]在2008年对拒马河北京段调查中监测到24种,袁立来等^[6]在2019—2020年对拒马河北京段调查中监测到33种。然而,针对整个拒马河流域的调查,近几十年未见报道。本研究在2019—2021年6次对拒马河鱼类资源调查中共发现37种,与王鸿

表 4 拒马河不同位点的主要贡献种相似性百分比分析

Tab. 4 The main contributionspecies of Juma River in different locals of similarity percentage analysis

物种Species	组 I Group I			组 II Group II			组 III Group III		
	AA	AS (%)	Con (%)	AA	AS (%)	Con (%)	AA	AS (%)	Con (%)
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	277.50	10.87	21.30	145.00	14.29	21.36	51.91	9.14	14.99
鲫 <i>Carassius auratus</i>	73.00	8.74	17.14	9.00	6.23	9.31	13.09	5.24	8.59
小黄鲂鱼 <i>Micropercops swinhonis</i>	24.50	6.56	12.86	41.00	10.97	16.40	31.91	7.28	11.93
泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	23.50	6.00	11.76				9.09	3.63	5.95
拉氏鲮 <i>Rhynchocypris lagowskii</i>	78.00	3.65	7.16						
赛丽高原鳅 <i>Triplophysa sellaefer</i>	17.50	2.82	5.54						
尖头鲮 <i>Rhynchocypris oxycephalus</i>	135.00	2.82	5.54						
达里湖高原鳅 <i>Triplophysa dalaica</i>	78.50	2.24	4.39						
林氏吻鰕虎鱼 <i>Rhinogobius lindbergi</i>	3.50	2.24	4.39	3.00	3.29	4.92			
棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>				39.50	9.39	14.04	4.73	2.43	3.98
黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>				15.00	7.18	10.73	6.91	3.74	6.12
子陵吻鰕虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>				8.50	4.82	7.20			
中间银鮡 <i>Squalidus intermedius</i>				9.00	4.15	6.21			
宽鳍鲮 <i>Zacco platypus</i>							55.91	8.07	13.22
黑鳍鲮 <i>Sarcochilichthys nigripinnis</i>							32.55	7.26	4.33
高体鲮 <i>Rhodeus ocellatus</i>							5.55	2.31	3.79
兴隆山小鰕鮡 <i>Microphysogobio hsinglungshanensis</i>							13.82	2.16	3.54
点纹银鮡 <i>Squalidus wolterstorffi</i>							18.27	2.11	3.45
刺鳅 <i>Sinibdella sinensis</i>							2.45	1.21	1.99
棒花鮡 <i>Gobio rivuloides</i>							2.36	1.09	1.78

注: AA. 平均多度, AS. 平均相似度, Con. 贡献度
Note: AA. average abund, AS. average similarity, Con. contribution

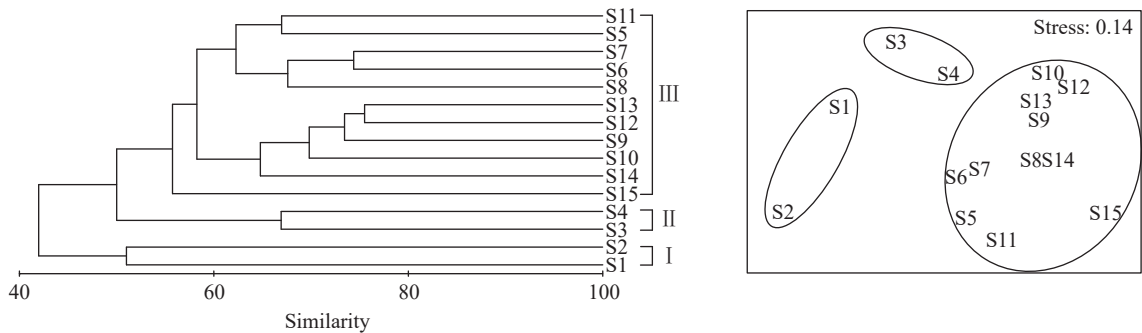


图 3 拒马河鱼类群落Cluster聚类和NMDS排序图
Fig. 3 Clustering and NMDS sequencing analysis of fish community structure in the Juma River

媛等^[34]的记录相比减少了多鳞铲颌鱼、花鲢*Hemibarbus maculatus* Bleeker、黄线薄鳅*Leptobotia flavolineata* Wang、东方薄鳅*Leptobotia orientalis* Xu, Fang & Wang和花斑副沙鳅*Parabotia fasciata* Dabry & Thiersant等, 这些鱼类对生态环境的改变极为敏感, 仅分布于水质清澈、溶氧量高和无污染

的狭窄水域。综合之前调查^[5,6,16], 这几种鱼类很可能已经在拒马河流域消失。受地理环境因素和人类活动的影响, 拒马河鱼类分布具有明显的区域性, 海拔在500 m以上的上游区域(组 I), 渔获物以花鳅科和条鳅科鱼类为主, 包括北鳅*Lefua costata* Kessler、达里湖高原鳅、赛丽高原鳅、尖头高原鳅、

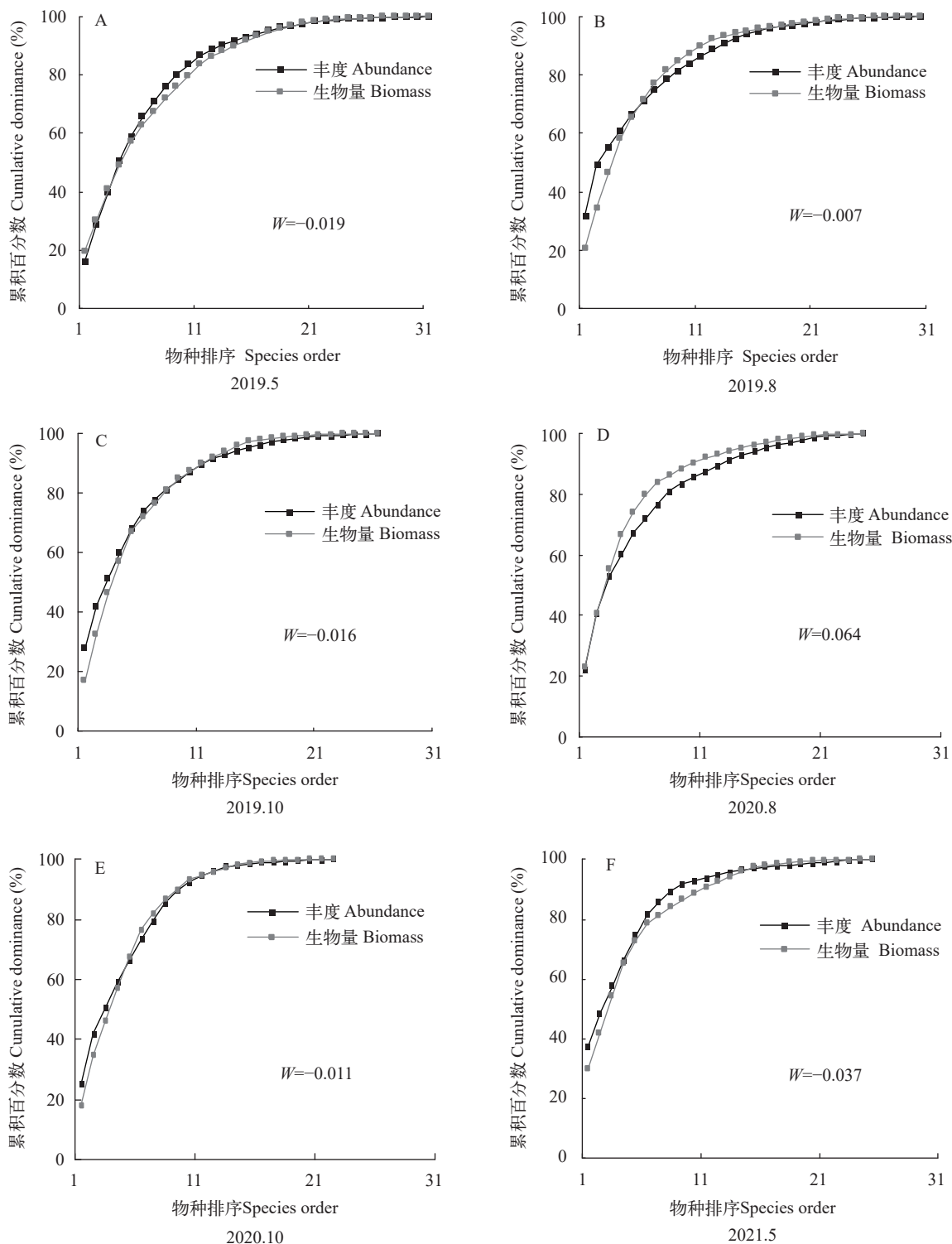


图4 拒马河不同季节鱼类群落ABC曲线

Fig. 4 ABC curves of fish community in the Juma River in different seasons

表 5 拒马河鱼类群落DCA分析

Tab. 5 Detrended correspondence analysis of fish community in the Juma River

排序轴编号No.	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Axis 4
特征值Eigenvalues	0.3306	0.2159	0.1402	0.0736
排序轴梯度长度Gradient length	2.84	2.28	2.13	1.81
物种累计解释变量百分比 Cumulative percentage explained variation of species (%)	13.74	22.72	28.54	31.60
物种和环境因子与排序轴相关 系数 Species-environment correlations	0.9414	0.8737	0.8688	0.8913

表 6 拒马河鱼类群落RDA分析

Tab. 6 Redundancy analysis of fish community in the Juma River

排序轴编号No.	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Axis 4
特征值Eigenvalues	0.217	0.073	0.047	0.034
累计解释变化率 Cumulative percentage explained variation (%)	21.73	29.03	33.69	37.09
物种和环境因子与排序轴相 关系数 Species-environment correlations	0.9466	0.8129	0.7315	0.5583
累计解释拟合变化率 Explained fitted variation (cumulative)	50.19	67.05	77.82	85.67

花斑花鳅*Cobitis melanoleuca* Nichols和北方泥鳅等;海拔在200m以上的中游区域(组II),水生态环境受人类影响相对较小,如S3和S4,渔获物以棒花鱼、中间银鲌为主要组成;海拔在200 m以下的下游区域(组III),位于旅游景区,水生态环境受到人类影响较大,如自S5至S15,渔获物以黑鳍鳊、麦穗鱼、小黄鲮鱼、高体鲮鱼和泥鳅等喜栖息小河流水环境具有一定耐受力鱼类为主。组I的平均相似性为51.01%,小于组II的66.92%和组III的61.00%,体现了拒马河上游地区相较于中下游地区更具生物多样性。

2019—2021年拒马河优势种有鲫、麦穗鱼、黑鳍鳊和宽鳍鱮等,按照初次性成熟小于2龄,最大体长小于24 cm的鱼类划分为小型鱼类的标准^[35],拒马河鱼类群落优势种几乎都是小型鱼类。从食性上看,拒马河鱼类以杂食性为主,马口鱼、黄颡鱼和刺鳅等偏肉食性鱼类较少,表明拒马河鱼类群落高位营养级少,水生态环境更适合杂食性鱼类的生存。生态类型方面,亲流性的鱼类物种数较多,符合内陆河流鱼类组成特点,但优势种中喜缓流及静水的鱼类较多,原因可能是拒马河拦河坝的修建导致河流片段化,部分河段水流速度减慢甚至形成小型静水湖泊,破坏了亲流性鱼类的捕食、产卵场所同时也为喜静水的鱼类提供了更合适的栖息环境所导致^[9, 36, 37],在设计河坝时,应优先考虑设计过

鱼通道及保护可能因河坝建设而受到影响的鱼类,降低因河坝的建设而导致的水文环境的改变对其造成的影响。在此次鱼类资源调查中,麦穗鱼在所有月份都作为鱼类群落的优势种出现,具有较高的生态优势度。麦穗鱼适应能力强、繁殖力高、食性广,同拒马河土著鱼类构成了竞争关系,且吞食鱼卵,干扰产卵场,对土著鱼类的生存构成极大威胁^[38]。对于麦穗鱼多的河段,应定期监控其种群动态,必要时可采取人为措施控制其种群数量。

多样性指数(H')和均匀度指数(J')是群落结构稳定的重要评价指标^[39],物种丰富度越高,个体数分布越均匀,群落结构越稳定,多样性指数和均匀度指数也就较大,反之,物种受到环境的胁迫,群落结构不稳定,多样性指数则低。在本研究中,拒马河鱼类群落夏季的多样性指数高于春、秋两季,这可能与夏季水温上升鱼类的活动频率增加有关。鱼类群落结构及物种多样性可以衡量水体健康情况,水生态环境恶化会直接影响鱼类的物种多样性,拒马河鱼类群落的Shannon-Wiener多样性指数(H')、Margalef丰富度指数(D_{Ma})及Pielou均匀度指数(J')均表明拒马河的水环境受到了一定程度的污染^[40]。

3.2 拒马河鱼类群落稳定性

Warwick^[41]于1986年提出丰度生物量比较曲线用于判断鱼类群落稳定性。ABC曲线将生物量优势度曲线和丰度优势度曲线放在同一坐标系中,通过两条曲线的分布来分析鱼类群落的受干扰程度^[42]。ABC曲线基于 r 选择和 k 选择的传统进化理论,群落结构稳定时,群落以 k 选择种类(生长慢,性成熟晚的大个体种类)为主要组成,生物量优势度曲线位于丰度优势度曲线之上。随着干扰的增加, k 选择的物种逐渐减少而 r 选择的物种(生长快,性成熟早的小个体种类)逐渐增加,丰度生物量比较曲线随之发生改变,群落受到中度干扰时,生物量优势度曲线与丰度优势度曲线相交;群落受到严重干扰时,生物量优势度曲线位于丰度优势度曲线之下^[43]。根据李胜法等^[43]的研究标准,拒马河鱼类群落整体只有2020年夏季结构稳定未受干扰,其他月份鱼类群落结构受到中等程度的干扰,但在拒马河不同河段受干扰程度存在差异,海拔500 m以上的两个位点,平均采集鱼类143.91尾,显著高于海拔低于500 m位点的48.19尾,并采集到数量可观的尖头鲈、拉氏鲈、赛丽高原鳅等对水质要求高的鱼类,可看出该河段鱼类群落受扰动程度较小。

3.3 拒马河鱼类群落结构与环境因子关系

拒马河鱼类多样性指数中个体数、物种数、

多样性指数、丰富度指数在不同季节间呈现显著性差异,表明拒马河鱼类群落主要受非生物因子的影响。Kadye等^[44]研究证明,温度、海拔、pH、溶解氧和距河口距离等是影响河流鱼类群落结构的主要环境因子。王卓等^[45]在研究汉江平川段鱼类群落结构与环境因子的关系中发现电导率(Cond)、5日生化需氧量(BOD₅)、pH和硫酸浓度是影响该江段鱼类群落结构的主要环境因子。本文通过

RDA分析得出海拔是影响拒马河鱼类群落结构的主要环境因子,对达里湖高原鳅、尖头高原鳅和北鳅等鳅科鱼类影响较大。水温作用于鱼类的分布、生长、繁殖和迁移,对拒马河鱼类群落结构的影响仅次于海拔,自拒马河源头至龙安大桥水温逐渐上升,鲫和高体鳊等温水性鱼类数量也逐渐增加。兴凯鳊与pH的变化呈正相关,而棒花鱼、刺鳅和瓦氏黄颡鱼等同pH的变化呈负相关,pH会对鱼

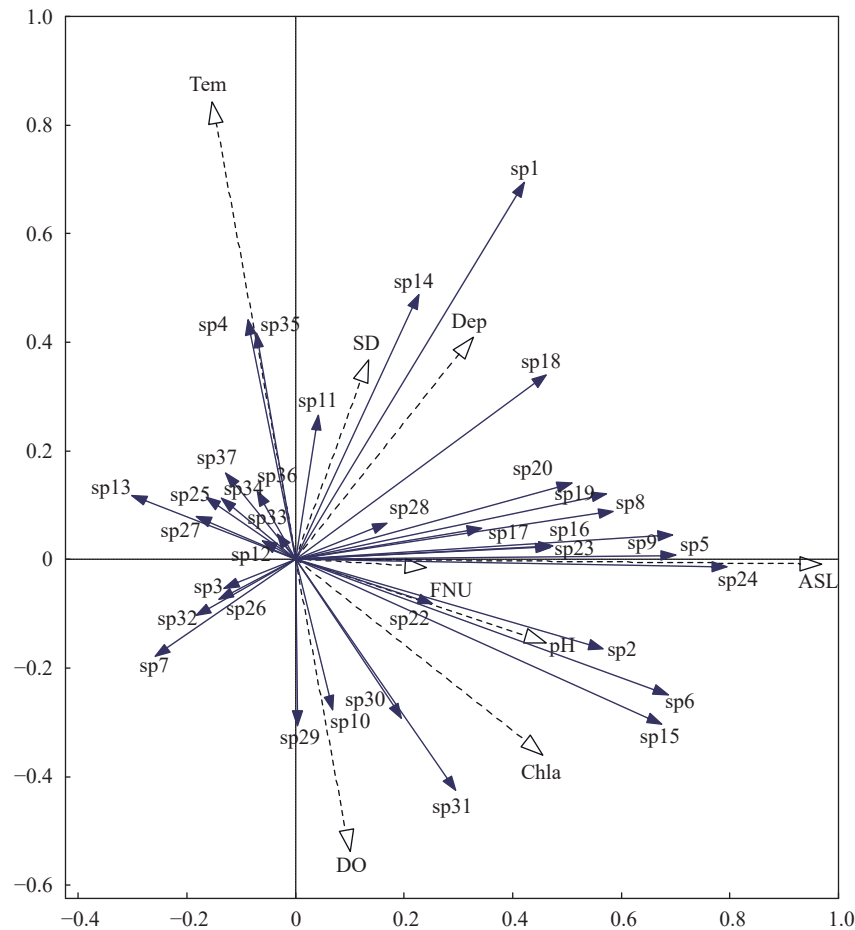


图5 拒马河鱼类与环境因子的RDA图

Fig. 5 Redundancy analysis of fish community and environmental factors in the Juma River

Tem. 水温; Dep. 水深; DO. 溶解氧; Chl.a. 叶绿素a; SD. 透明度; ASL. 海拔; FNU. 浊度; PH. 酸碱度; sp1. 鲫; sp2. 兴凯鳊; sp3. 中华鳊; sp4. 高体鳊; sp5. 尖头鳊; sp6. 拉氏鳊; sp7. 宽鳊; sp8. 马口鱼; sp9. 麦穗鱼; sp10. 点纹银鳊; sp11. 中间银鳊; sp12. 兴隆山小鳊; sp13. 黑鳊; sp14. 棒花鳊; sp15. 棒花鱼; sp16. 蛇鳊; sp17. 泥鳅; sp18. 北方泥鳅; sp19. 大鳞副泥鳅; sp20. 花斑花鳊; sp21. 北鳊; sp22. 塞丽高原鳊; sp23. 尖头高原鳊; sp24. 达里湖高原鳊; sp25. 刺鳅; sp26. 黄鳊; sp27. 子陵吻鳊; sp28. 林氏吻鳊; sp29. 波氏吻鳊; sp30. 福岛吻鳊; sp31. 小黄鳊; sp32. 圆尾斗鳊; sp33. 黄颡鱼; sp34. 瓦氏黄颡鱼; sp35. 乌苏里黄颡鱼; sp36. 鲢; sp37. 青鳊

Tem. temperature; Dep. depth; DO. dissolved oxygen; Chl.a. chlorophyll a; SD. transparency; ASL. altitude; FNU. formazin unit; pH. potential of hydrogen sp1. *Carassius auratus*; sp2. *Acheilognathus chankaensis*; sp3. *Rhodeus sinensis*; sp4. *Rhodeus ocellatus*; sp5. *Rhynchocypris oxycephalus*; sp6. *Rhynchocypris lagowskii*; sp7. *Zacco platypus*; sp8. *Opsariichthys bidens*; sp9. *Pseudorasbora parva*; sp10. *Squalidus wolterstorffi*; sp11. *Squalidus intermedius*; sp12. *Microphysogobio hsinglungshanensis*; sp13. *Sarcohilichthys nigripinnis*; sp14. *Gobio rivuloides*; sp15. *Abbottina rivularis*; sp16. *Saurogobio dabryi*; sp17. *Misgurnus anguillicaudatus*; sp18. *Misgurnus bipartitus*; sp19. *Misgurnus dabryanus*; sp20. *Cobitis melanoleuca*; sp21. *Lefua costata*; sp22. *Triplophysa sellaefer*; sp23. *Triplophysa cuneicephala*; sp24. *Triplophysa dalaica*; sp25. *Sinobdella sinensis*; sp26. *Monopterus albus*; sp27. *Rhinogobius similis*; sp28. *Rhinogobius lindbergi*; sp29. *Rhinogobius cliffordpopei*; sp30. *Rhinogobius fukushimai*; sp31. *Micropercops swinhonis*; sp32. *Macropodus ocellatus*; sp33. *Tachysurus fulvidraco*; sp34. *Pelteobagrus vachellii*; sp35. *Pelteobagrus ussuriensis*; sp36. *Silurus asotus*; sp37. *Oryzias sinensis*

的摄食和生长产生影响,也会影响鱼的感官、代谢、呼吸等生理过程^[46]。溶解氧与波氏吻鰕虎鱼 *Rhinogobius cliffordpopei* Nichols、福岛吻鰕虎鱼等小型肉食性鱼类相关性较强,符合肉食性鱼类耗氧高的特点。叶绿素 a 也是影响拒马河鱼类群落结构的重要环境因子,叶绿素 a 与浮游植物的密度密切相关,对小黄鲂鱼和棒花鱼等杂食性鱼类影响较大。

4 结论

本研究系统地调查了拒马河鱼类资源,共发现鱼类37种,隶属于5目11科,补充了拒马河上游区域的物种组成和地理分布等缺乏的基本问题,为拒马河鱼类资源开发利用和资源保护提供了基础数据。基于等级聚类分析(Cluster)和非参数多变量排序(NMDS)分析发现,拒马河鱼类分布在空间上具有明显的区域性,上游以适应清澈流水环境的花鳅科和条鳅科鱼类为主;中上游以棒花鱼、中间银鲃为主;中下游以黑鳍鳊、麦穗鱼、小黄鲂鱼和泥鳅等具有一定耐受力的鱼类为主,这对拒马河生态修复和水利工程修建能提供理论依据。通过群落优势种和丰度生物量比较曲线分析发现,拒马河以耐污性较强的小型鱼类为主,主要为鲫、麦穗鱼、黑鳍鳊和宽鳍鱮等,鱼类群落结构受到一定程度的干扰;冗余分析显示,海拔是影响拒马河鱼类分布的主要环境因子。拒马河是大清河水系的主要河流,目前已有“北京市房山区拒马河水生野生动物自然保护区”,建议进一步根据拒马河独特的水生态环境划定生态保护红线,加强对该流域生物多样性的保护。

参考文献:

- [1] Guan Y Q, Guo Y X, Li B, *et al.* Phytoplankton community character and water quality assessment of Juma River [J]. *Journal of Hebei University (Natural Science Edition)*, 2007, **27**(4): 401-406. [管越强, 郭云学, 李博, 等. 拒马河浮游植物群落特征及水质评价 [J]. 河北大学学报(自然科学版), 2007, **27**(4): 401-406.]
- [2] Li B, Shi H. Investigation and protection recommendations for aquatic plant resources in the Juma River Basin in Beijing [J]. *China Fisheries*, 2017(12): 60-61. [李博, 时慧. 北京拒马河流域水生植物资源调查及保护建议 [J]. 中国水产, 2017(12): 60-61.]
- [3] Li F C, Kang X J, Yang W B, *et al.* Protozoan community character in relation to trophic level in the Beijing section of the Juma River [J]. *Biodiversity Science*, 2006, **14**(4): 327-332. [李凤超, 康现江, 杨文波, 等. 拒马河北京段原生动物群落特征及其对河流营养状况的指示 [J]. 生物多样性, 2006, **14**(4): 327-332.]
- [4] Wang H W, Zhang L Y, Shen G M, *et al.* Assessment of water quality in Juma River by the community structure and biodiversity of zoobenthos [J]. *Journal of Hebei University (Natural Science Edition)*, 2007, **27**(5): 530-536. [王宏伟, 张蕾颖, 沈公铭, 等. 拒马河底栖动物多样性及其水质评价 [J]. 河北大学学报(自然科学版), 2007, **27**(5): 530-536.]
- [5] Kou L Q. Study on ecological health assessment and protection countermeasures of Juma River [J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2021(4): 37-41. [寇利卿. 拒马河生态健康评估及保护对策探究 [J]. 水科学与工程技术, 2021(4): 37-41.]
- [6] Yuan L L, Wang X M, Yang W B, *et al.* River ecosystem health evaluation of Juma River in Beijing based on fish-index of biotic integrity [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2021, **16**(4): 160-169. [袁立来, 王晓梅, 杨文波, 等. 基于鱼类生物完整性指数的拒马河北京段河流健康评价 [J]. 生态毒理学报, 2021, **16**(4): 160-169.]
- [7] Feng S J, Wang C F, Tan H, *et al.* Fish resource investigation of Dongqing Hydropower Station Reservoir in Beipan River Basin [J]. *Journal of Hydroecology*, 2018, **39**(2): 70-76. [冯三杰, 王从锋, 谭宏, 等. 北盘江董箐水电站库区鱼类资源调查 [J]. 水生态学杂志, 2018, **39**(2): 70-76.]
- [8] Shang S Q, Xiang H, Cao L Z, *et al.* Characteristics of fish functional groups in Jinan and their relationship with water environment factors [J]. *Yellow River*, 2021, **43**(S1): 96-98. [商书芹, 相华, 曹龙智, 等. 济南鱼类功能群特征及其与水环境因子关系 [J]. 人民黄河, 2021, **43**(S1): 96-98.]
- [9] Sousa R G C, de Freitas H C P, Zacardi D M, *et al.* Effects of river dams on the fish guilds in the northwest region of the Brazilian Amazon [J]. *Fisheries Research*, 2021(243): 106091.
- [10] Poulet N. Impact of weirs on fish communities in a piedmont stream [J]. *River Research and Applications*, 2007, **23**(9): 1038-1047.
- [11] Yan Y, Wang H, Zhu R, *et al.* Influences of low-head dams on the fish assemblages in the headwater streams of the Qingyi watershed, China [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2013, **96**(4): 495-506.
- [12] Liu S H, Zhang H F, He Y L, *et al.* The preliminary study of ecosystem health assessment in Shanghai adjacent waters, in China, based on estuarine biotic integrity index [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(8): 1494-1501. [刘守海, 张昊飞, 何彦龙, 等. 基于河口生物完整性指数评价上海周边海域健康状况的初步研究 [J]. 生态环境学报, 2018, **27**(8): 1494-1501.]
- [13] He S X, He B Y. Study on fish community structure and its relationship with environmental factors in Fangchenghe Estuary of Guangxi, China [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2019, **38**(5): 86-97. [何思璇, 何斌源. 防城河口湾鱼类群落结构及其与环境因子关系研究 [J]. 热带海洋学报, 2019, **38**(5): 86-97.]
- [14] Li J, Li X H, Jia X P, *et al.* Relationship between fish community diversity and environmental factors in the Lianjiang River, Guangdong, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(18): 5795-5805. [李捷, 李新辉, 贾晓平, 等.

- 连江鱼类群落多样性及其与环境因子的关系 [J]. *生态学报*, 2012, **32**(18): 5795-5805.]
- [15] Wang X L, Xu B D, Ji Y P, *et al.* Fish community structure and its relationships with environmental factors in Haizhou Bay and adjacent waters of East China in winter [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(6): 1707-1714. [王小林, 徐宾铎, 纪毓鹏, 等. 海州湾及邻近海域冬季鱼类群落结构及其与环境因子的关系 [J]. *应用生态学报*, 2013, **24**(6): 1707-1714.]
- [16] Yang W B, Li J L, Li X X, *et al.* Fish composition and species biodiversity of the Beijing section of Juma River [J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2008(2): 175-181. [杨文波, 李继龙, 李绪兴, 等. 拒马河北京段鱼类组成及其多样性 [J]. *上海水产大学学报*, 2008(2): 175-181.]
- [17] Zhang C G, Zhao Y H. Fishes in Beijing and Adjacent Areas, China [M]. Beijing: Science Press, 2013: 70-219. [张春光, 赵亚辉. 北京及其邻近地区的鱼类: 物种多样性、资源评价和原色图谱 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 70-219.]
- [18] Zhang J M, He Z H. Handbook for Surveys of Natural Resources of Inland Water Fisheries [M]. Beijing: Agricultural Press, 1991: 242-331. [张觉民, 何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册 [M]. 北京: 农业出版社, 1991: 242-331.]
- [19] Li S Z, Zhang C G. Fauna Sinica, Ostichthyces [M]. Beijing: Science Press, 2011: 439-537. [李思忠, 张春光. 中国动物志, 硬骨鱼纲 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 439-537.]
- [20] Wang S A, Wang Z M, Li G L, *et al.* Hebei Fauna Fish [M]. Shijiazhuang: Hebei Science & Technology Press, 2001: 299-301. [王所安, 王志敏, 李国良, 等. 河北动物志 鱼类 [M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2001: 299-301.]
- [21] Zhu S Q. The Synopsis of Freshwater Fishes of China [M]. Nanjing: Phoenix Science Press, 1995: 14-16. [朱松泉. 中国淡水鱼类检索 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1995: 14-16.]
- [22] Ulanowicz R E. Information theory in ecology [J]. *Computers & Chemistry*, 2001, **25**(4): 393-399.
- [23] Shannon C E. A mathematical theory of communication [J]. *The Bell System Technical Journal*, 1966(13): 379-423.
- [24] Pielou E C. The measurement of diversity in different types of biological collections [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1966(13): 131-144.
- [25] Pinkas L, Oliphant M S, Iverson I. Food habits of albacore, bluefin tuna, and bonito in California waters [J]. *Calif Fish Game*, 1971(152): 109-112.
- [26] Liu Y S, Tang S K, Li D M, *et al.* Characteristics of the fish community structure in Jiangsu reach of the Huaihe River [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2020, **27**(2): 224-235. [刘燕山, 唐晟凯, 李大命, 等. 淮河流域江苏段鱼类群落结构特征 [J]. *中国水产科学*, 2020, **27**(2): 224-235.]
- [27] Yemane D, Field J G, Leslie R W. Exploring the effects of fishing on fish assemblages using Abundance Biomass Comparison (ABC) curves [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2005, **62**(3): 374-379.
- [28] Dang Y C, Dai X Y, Wu F, *et al.* Seasonal variations in fish community structure in the Dianshan Lake [J]. *Fisheries Science*, 2021, **40**(3): 361-368. [党莹超, 戴小杰, 吴峰. 淀山湖鱼类群落结构季节性变化分析 [J]. *水产科学*, 2021, **40**(3): 361-368.]
- [29] Clarke K R. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure [J]. *Austral Ecology*, 1993, **18**(1): 117-143.
- [30] Shao Y, Tang W Q, Gong L, *et al.* Analysis of the fish species diversity and assemblage of the Dianshan Lake and upper reaches of the Huangpu River in Shanghai [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021(6): 1-23. [邵严, 唐文乔, 龚琰, 等. 上海淀山湖及黄浦江上游鱼类物种多样性及群落结构分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2021(6): 1-23.]
- [31] Guo Q H, Zhu H. Analysis of precipitation characteristics in mountainous area of Juma River Basin of Hebei Province [J]. *Journal of Hebei Engineering and Technical College*, 2012(2): 1-4. [郭庆宏, 朱虹. 河北省拒马河山区降水特性分析 [J]. *河北工程技术高等专科学校学报*, 2012(2): 1-4.]
- [32] Li G L. Discussion on freshwater fish fauna in Hebei Province [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 1986, **21**(4): 4-9. [李国良. 关于河北省淡水鱼类区系的探讨 [J]. *动物学杂志*, 1986, **21**(4): 4-9.]
- [33] Li G L. A preliminary study on the geographical regionalization of freshwater fish in Hebei [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 1989, **24**(5): 13-16. [李国良. 河北淡水鱼类地理区划的初探 [J]. *动物学杂志*, 1989, **24**(5): 13-16.]
- [34] Wang H Y. Fishes of Beijing [M]. Beijing: Beijing Publishing House Group, 1984: 22-184. [王鸿媛. 北京鱼类志 [M]. 北京: 北京出版社, 1984: 22-184.]
- [35] Zhang X K, Yu D P, Wang H L, *et al.* Fish community structure in main habitat of the finless porpoise, the Anqing section of Yangtze River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(7): 1832-1839. [张晓可, 于道平, 王慧丽, 等. 长江安庆段江豚主要栖息地鱼类群落结构 [J]. *生态学报*, 2016, **36**(7): 1832-1839.]
- [36] Nilsson C, Reidy C A, Dynesius M, *et al.* Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems [J]. *Science*, 2005, **308**(5720): 405-408.
- [37] Poff N, Zimmermann J. Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows [J]. *Freshwater Biology*, 2010, **55**(1): 194-205.
- [38] Han J J, Chen P, Qi F, *et al.* Situations of fish stocks in Weigan River in Xinjiang [J]. *Fisheries Science*, 2022, **41**(1): 92-101. [韩军军, 陈朋, 祁峰, 等. 新疆渭干河流域鱼类资源现状 [J]. *水产科学*, 2022, **41**(1): 92-101.]
- [39] Xu K D, Zhang H L, Xie H Y, *et al.* Resource density and community diversity of crustaceans in the waters of Zhongjieshan Islands [J]. *Marine Fisheries*, 2012, **34**(3): 308-315. [徐开达, 张洪亮, 谢汉阳, 等. 中街山列岛水域甲壳类资源及其群落多样性 [J]. *海洋渔业*, 2012, **34**(3): 308-315.]

- [40] Sun X. The study on fish species diversity and analysis of influencing factors of Muling River watershed [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017. [孙旭. 穆稜河流域鱼类物种多样性研究及影响因素分析 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.]
- [41] Warwick R M. A new method for detecting pollution effects on marine macrobenthic communities [J]. *Marine Biology*, 1986, **92**(4): 557-562.
- [42] Clarke K R, Warwick R. Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation [J]. *Primer-e*, 2001(3): 7-12.
- [43] Li S F. Status of fish community in East China Sea using the method of abundance-biomass comparison (ABC) curve [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2008, **15**(1): 136-144. [李圣法. 以数量生物量比较曲线评价东海鱼类群落状况 [J]. *中国水产科学*, 2008, **15**(1): 136-144.]
- [44] Kadye W T, Magadza C H D, Moyo N A G, *et al.* Stream fish assemblages in relation to environmental factors on a montane plateau (Nyika Plateau, Malawi) [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2008, **83**(4): 417-428.
- [45] Wang Z, Song C, Yan W L, *et al.* Biodiversity and spatial pattern of fish in the Pingchuan Segment of the upper reaches of Hanjiang River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(7): 1675-1681. [王卓, 宋策, 闫文龙, 等. 汉江上游平川段鱼类群落多样性及空间格局分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2019, **28**(7): 1675-1681.]
- [46] Liu Y S, Gu X K, Tang S K, *et al.* Fish community structure and its relationship with main environmental variables in the East Taihu Lake [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(2): 769-780. [刘燕山, 谷先坤, 唐晟凯, 等. 东太湖鱼类群落结构特征及其与环境因子的关系 [J]. *生态学报*, 2021, **41**(2): 769-780.]

FISH COMMUNITY STRUCTURE AND ITS RELATIONSHIP WITH ENVIRONMENTAL FACTORS IN JUMA RIVER IN HAIHE RIVER BASIN

WANG Meng, WANG Yin-Xiao, TAN Hui-Min, WANG Min, MU Shu-Mei, Kang Xian-Jiang and CHEN Yong-Xia

(Institute of Life Science and Green Development, Hebei University, Baoding 071002, China)

Abstract: In order to understand the fish community structure in Juma River and its relationship with the environmental factors, 15 sampling stations in Juma River were surveyed in May, August and October, 2019, August and October, 2020 and May, 2021. A total of 37 fish were collected, belonging to 11 families and 5 orders. Cypriniformes were the most, accounting for 64.86% of the total species captured. Ecologically, the fish community in Juma River is dominated by demersal and omnivores species and there are fewer carnivorous fish. Compared with the historical data, the number of fish species has decreased. Index Relative Importance (IRI) shows that 10 species had $IRI \geq 500$, *Carassius auratus*, *Pseudorasbora parva*, *Zacco platypus* were the dominant species. *C. auratus*, *P. parva* and *Micropercops swinhonis* were collected in all seasons and all sampling sites. One-way analysis of variance (ANOVA) showed that the number of individuals (N), species (S), Shannon-Wiener diversity index (H') and Margalef richness index (D_{Ma}) of the fish community had significant differences between different seasons, Pielou evenness index (J') showed no significant differences. SNK multiple comparison test showed that the number of individuals and species was the highest in May 2019, Shannon-Wiener diversity index (H') and Margalef richness index (D_{Ma}) was the highest in August 2019. The numbers of individuals showed significant differences between different altitudes, an average of 143.91 fishes can be collected at sampling station above 500 meters and only 48.19 fishes can be collected at sampling station below 500 meters. Cluster analysis and Non-metric Multidimensional Scaling (NMDS) divides the source of the Juma River and the Diaojianghui into group I, the Zijingguan Bridge and Qingliangjian into group II, remaining sites are divided into group III. The abundance biomass comparison curve (ABC) showed that the fish community was undisturbed only in August 2020 and was moderately disturbed in the remaining months. Redundancy analysis (RDA) showed that altitude, chlorophyll a, and temperature were the main environmental factors affecting the fish community in Juma River. Altitude is the environmental factor that greatestly affects the structure of fish communities in the Juma River, it has a great influence on *Triplophysa cuneicephala*, *Triplophysa dalaica* and *Rhynchocypris oxycephalus*. Chlorophyll a was highly correlated with the density of phytoplankton and it has a great influence on *Micropercops swinhonis*, *Zacco platypus* and other omnivorous fish.

Key words: Fish communities; Structural characteristics; Diversity; Richness; Environmental factors; Juma River

附表 S1 拒马河鱼类分布

Attached table S1 Fish species distribution in Juma River

[illegible]

续表 S1

物种 Species	采样地点Sampling site														
	拒马河 源头	刁江 汇	紫荆关 大桥	清凉 涧	小丰 口桥	别岸	琅琊 河	天花 板	北石 门	西河 口	九渡	六渡	穆家 口	千河 口	龙安 大桥
黄鳝 <i>Monopterus albus</i>															+
鲈形目Percoidei															
鰕虎鱼科Gobiidae															
子陵吻鰕虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	+		+	+											+
林氏吻鰕虎鱼 <i>Rhinogobius lindbergi</i>	+	+	+	+	+	+		+						+	+
波士吻鰕虎鱼 <i>Rhinogobius cliffordpopei</i>	+			+				+	+			+		+	+
福岛吻鰕虎鱼 <i>Rhinogobius fukushimai</i>			+	+	+	+	+							+	+
沙塘鳢科Odontobuidae															
小黄鲂鱼 <i>Micropercops swinhonis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
丝足鲈科Osphronemidae															
圆尾斗鱼 <i>Macropodus chinensis</i>											+			+	+
鲇形目Siluriformes															
鲿科Bagridae															
黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachellii</i>							+	+	+		+				
乌苏里黄颡鱼 <i>Pelteobagrus ussuriensis</i>					+		+	+			+				+
鲇科Siluridae															
鲇 <i>Silurus asotus</i>				+	+		+	+		+	+	+			
颌针鱼Beloniformes															
青鳉科Adrianichthyidae															
青鳉 <i>Oryzias sinensis</i>												+			

注：“+”表示现场调查采集到样本
Note: “+” represents collected fish species in the surveys