

基于人类干扰响应特征的黄河上游干流鱼类指示物种筛选*

卓玉^{1,2,6}, 李钧乐^{1,2}, 李柯懋^{4,5}, 简生龙^{4,5}, 隋晓云^{1,2}, 周诗嘉^{1,2,3}, 张婉婧^{1,2,3}, 贾银涛^{1,2**}, 陈毅峰^{1,2}

(1.中国科学院水生生物研究所, 水产品种创制与高效养殖全国重点实验室, 武汉 430072)

(2.中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

(3.中国科学院大学, 北京 100049)

(4.青海省渔业技术推广中心青海省渔业环境监测中心, 西宁 810012)

(5.青海省高原水生生物及生态环境重点实验室, 西宁 810012)

(6.生态环境部长江流域生态环境监督管理局生态环境监测与科学研究中心, 武汉 430010)

摘要: 鱼类指示物种法是水生态健康评价的重要工具, 其关键在于筛选出对环境变化敏感且具有代表性的物种。为构建适用于黄河上游干流的鱼类指示物种筛选体系, 本研究基于 2022-2023 年野外调查数据, 结合鱼类群落分布特征及其与环境因子的响应关系, 通过多维度分析方法筛选指示物种, 并利用指示值法对筛选结果进行了验证。首先, 冗余分析分析了鱼类分布与水环境因子的关联性, 并分析物种分布对每一环境因子的响应; 其次, 利用 RLQ 和四角分析量化了鱼类功能性状与环境梯度的耦合关系; 最后, 基于以上两种方法筛选出对环境变化具有显著响应的物种作为指示物种。最终确定黄河裸裂尻鱼 (*Schizopygopsis pylzovi*)、骨唇黄河鱼 (*Chuanchia labiosa*)、花斑裸鲤 (*Gymnocypris eckloni*)、极边扁咽齿鱼 (*Platypharodon extremus*)、厚唇裸重唇鱼 (*Gymnodiptychus pachycheilus*) 和拟鲑高原鳅 (*Triplophysa siluroides*) 等 6 种鱼类为黄河上游干流关键指示物种。然后基于指示值法评估物种对特定生境的指示强度, 对筛选结果进行验证, 结果发现: 6 种指示物种中的黄河裸裂尻鱼、骨唇黄河鱼、极边扁咽齿鱼、厚唇裸重唇鱼和拟鲑高原鳅等 5 种鱼类均具有显著指示作用。随后利用随机森林模型分析了指示物种的出现与否和环境扰动之间的关系及其响应趋势, 发现水库年龄、水产养殖年限以及大坝数量是预测指示物种出现与否的重要变量, 随着水库年龄、水产养殖年限和大坝数量的增加, 指示物种出现频率显著下降。本研究成果可为指示物种筛选提供方法学参考, 同时也为流域水生态保护与管理提供了科学依据。

关键词: 黄河上游; 鱼类; 指示物种

Screening of Fish Indicator Species in the upper Yellow River Based on Responses to Anthropogenic Disturbance.

Zhuo Yu^{1,2,6}, Li Junle^{1,2}, Li Kemao^{4,5}, Jian Shenglong^{4,5}, Sui Xiaoyun^{1,2}, Zhou Shijia^{1,2,3}, Zhang Wanjing^{1,2,3}, Jia Yintao^{1,2} and Chen Yifeng^{1,2}

(1: Key Laboratory of Breeding Biotechnology and Sustainable Aquaculture (CAS), Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, 430072, P.R.China)

(2: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P.R.China)

(3: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

(4: Qinghai Provincial Fishery Technology Extension Center, Xining 810012, P.R.China)

(5: Key Laboratory of Plateau Aquatic and Environmental in Qinghai Province, Xining 810012, P.R.China)

(6: Changjiang Basin Ecology and Environment Monitoring and Scientific Research Center, Changjiang Basin Ecology and Environment Administration, Ministry of Ecology and Environment, Wuhan 430010, P.R.China)

Abstract: The indicator species approach is an important tool for assessing the health of aquatic ecosystems. Its effectiveness

*2025-07-08 收稿; 2025-12-29 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2021YFC3200103) 和国家自然科学基金项目(32171659; U22A20454) 联合资助。

** 通信作者: Email: jiayintao@ihb.ac.cn.

depends on the selection of species that are both sensitive to environmental changes and representative of the local ecological community. This study aimed to establish a fish-based indicator species framework suitable for the upper reaches of the Yellow River. Drawing on field survey data collected from 2022 to 2023, we integrated fish community distribution patterns with species-environment relationships using a multi-faceted analytical approach and validated the results via the Indicator Value (IndVal) method. First, redundancy analysis (RDA) was employed to explore the associations between fish distributions and environmental variables, and to assess species-specific responses to individual environmental gradients. Subsequently, RLQ and Fourth-corner analyses were used to quantify the coupling between fish functional traits and environmental gradients. Species that exhibited significant responses in both analyses were selected as candidate indicator species. Ultimately, six key indicator species were identified for the upper reaches of the Yellow River: *Schizopygopsis pylzovi*, *Chuanchia labiosa*, *Gymnocypris eckloni*, *Platypharodon extremus*, *Gymnodiptychus pachycheilus*, and *Triplophysa siluroides*. The IndVal method was then used to evaluate the indicator strength of these species for specific habitats. Among them, five species—*S. pylzovi*, *C. labiosa*, *P. extremus*, *G. pachycheilus*, and *T. siluroides*—exhibited statistically significant indicator values. Furthermore, the Random Forest Model was applied to examine the relationships between the occurrence of indicator species and environmental factors. The results revealed that reservoir age, aquaculture age, and the cumulative number of dams were the most important predictors of species presence or absence. As these variables increased, the occurrence frequency of indicator species decreased significantly. This study provides a methodological reference for the selection of indicator fish species and offers a scientific basis for the ecological protection and management of river basins. In addition, these findings provide a methodological basis for the identification of indicator species and valuable insights to support ecological monitoring, conservation planning, and watershed management in the Yellow River Basin.

Key Words: the upper Yellow River; Fish; Indicator species

指示物种 (Indicator species) 是指能够表征特定环境状态或生态过程的生物类群, 其存在、多度或功能性状可间接反映难以直接监测的环境特征或生物多样性状况^[1,2]。作为生态监测的重要工具, 理想的指示物种需要满足以下标准: (1) 对环境变化的响应具有敏感性与特异性; (2) 能够提供生态系统退化的早期预警信号; (3) 可预测区域物种组成或功能群落的演变趋势^[3]。指示物种法因其可操作性强、对分类学专业要求相对较低等优势, 已成为水生态健康评价的重要工具。在水生态系统中, 鱼类因其生活史长、活动范围广且生理响应明确, 已成为评估流域健康状况的关键指示生物^[4]。例如, 德国莱茵河治理工程将鲑鱼 (*Salmo salar*) 的洄游恢复情况作为生态修复成效的核心指标^[5]; 贾银涛^[6]基于唇鲮 (*Hemibarbus labeo*) 和黄尾鲮 (*Xenocypris davidi*) 的种群动态, 构建了东江河流健康评价体系。

现有的指示物种筛选方法主要分为两类: (1) 专家经验法: 如美国鱼类和野生动物管理局 (U.S. Fish and Wildlife Service) 依据物种的经济价值、公众认知度及生态功能重要性等维度, 确定具有代表性的生物物种用于生态监测^[7,8]。然而, 该方法存在一定主观性, 所选物种未必对生态系统扰动具备高敏感性, 限制了其在动态环境中的适应性与科学性。(2) 定量评估法: Hill 等^[9]提出根据栖息地类型的结果对物种进行分类, 以确定指示种, 并在此基础上, 提出了 TWINSPAN 方法用以筛选指示物种^[10]。Hutto 等^[11]提出了一种基于特定生境类型物种出现与否的定量方法。Dufrière 等^[12]提出了结合物种的丰度和出现频率的指示种分析法。这种方法可以体现站点数量和物种丰富度的差异。此外, Newman^[13]采用物种内在的敏感性、当前濒危状况和管理的重要性三个特性, 量化不同鱼类对环境干扰的敏感程度, 确定指示物种用以评估渔业资源变动。尽管上述方法为指示种筛选提供了理论基础与技术路径, 但多数方法仍主要基于物种分布或丰度数据, 未能充分整合功能性状的生态响应机制^[14]。且目前的研究重于筛选过程确立, 却疏于研究结果有效性确认^[15], 这会导致筛选结果能否有效反映水体健康状况成疑, 因此, 当前亟需构建完善的指示物种筛选与验证体系。

黄河作为中华文明的发源地, 其上游区域是流域主要产流区与水源涵养地^[16,17]。该区域独特的高寒气候孕育了复杂多样的生态系统, 同时也使其成为全球生态敏感带之一。区域内鱼类区系呈现出显著的特有性与脆弱性特征, 众多土著鱼类如极边扁咽齿鱼 (*Platypharodon extremus*)、骨唇黄河鱼 (*Chuanchia labiosa*)

等，因生长周期长、繁殖力低、生态位狭窄，对环境扰动极为敏感^[18-22]。与此同时，作为国家重要水电能源基地，黄河上游干流规划建设 38 座梯级水电站，仅青海省境内黄河干流目前（截至 2023 年）已建成 12 座梯级电站^[23,24]。高强度的水电开发与人类活动，导致河流生态基流改变、栖息地破碎化、水温节律紊乱等问题，对鱼类生存构成严峻威胁^[25-27]。

在此背景下，本研究以黄河上游干流为研究区域，基于物种分布特征、生态习性 & 功能性状等多维指标，系统构建鱼类指示物种筛选方法体系，并对筛选结果进行了验证。研究旨在突破传统单一指标筛选局限，通过整合生态学理论与数理统计方法，为鱼类指示物种筛选与验证提供新范式；同时为黄河上游水生生态保护规划、生物多样性恢复及水电开发生态补偿机制构建，提供科学决策依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域及样点设置

本研究选取黄河源头至积石峡河段作为核心研究区域。该河段不仅是黄河重要产流区，也是高原鱼类多样性的关键分布带，其生态完整性对黄河流域水生生态安全具有战略意义。基于流域水文特征与人类活动干扰梯度，采用随机抽样原则，并综合考虑工程分布（如水坝、水库）与道路可达性等因素设置采样点。在黄河上游干流共布设采样断面 87 个，并分别于 2022 年 6 - 7 月和 2023 年 5 - 7 月开展了两次系统性的鱼类调查。其中，2022 年调查样点 55 个，2023 年调查样点 61 个，两年间重复调查样点 29 个。羊曲至积石峡河段人类活动（如水电开发、沿岸道路建设）密集，且水文情势与生境类型在短距离内变化显著。为精确反映高强度干扰条件下的生态梯度变化，本研究在该河段设置了相对密集的采样样点。相较之下，玛尔挡以上河段地处偏远、交通不便，且河流仍保持较高的自然性，因此样点布设相对较少。

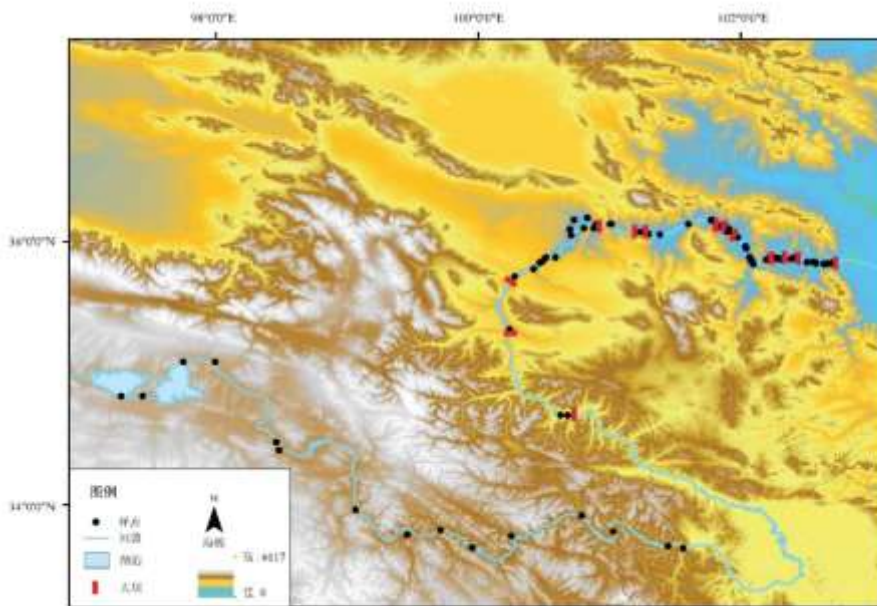


图 1 黄河上游干流鱼类调查样点

Fig1. The location of the sampling sites of the upper Yellow River

1.2 鱼类数据采集

采用三层刺网和地笼进行渔获物调查^[25, 28]，每个样点各放置一个刺网（10mm-150mm，长 80m，高 1.5m）和一个地笼（地笼长 30m），记录采样时间，并采用单位时间捕捞努力量对鱼类丰度数据进行标准化^[29]，对重复的调查样点调查结果在标准化后取两次调查的均值。参考《黄河鱼类志》^[30]、《中国淡水鱼

类检索》^[31]、《中国条鳅志》^[32]进行鉴定。对于无法通过形态特征明确鉴定的物种，采集其鳍条样本并用酒精固定，带回实验室进行分子生物学鉴定。统计各样点的渔获物物种组成，并测量鱼类体长、体高等生物学数据。

根据物种生物地理来源将鱼类分为土著鱼类与外来鱼类。土著鱼类指在研究区域（黄河流域青海段）内，有自然历史分布记录的物种。外来鱼类指通过人类活动直接或间接从该区域之外引入的物种。物种的历史分布情况主要依据《中国动物志》、《青藏高原鱼类》等书籍以及已发表的该区域鱼类区系历史调查文献^[18,20,30-32]。本研究仅纳入黄河上游水源涵养区的土著鱼类数据进行分析。主要有以下原因：（1）土著鱼类在长期适应当地环境的过程中形成了相对稳定的生态位，对大坝修建、水产养殖、栖息地改变等人类活动干扰具有显著的响应，其分布格局更能揭示生态系统在受扰动过程中的真实变化。而外来鱼类的分布往往主要受人工放流、养殖和引种等人为活动驱动，而非自然环境梯度的制约。此外，许多外来鱼类具有较强的生态适应性和竞争优势，能够在多种环境条件下生存。这种广生态位特征削弱了其对特定环境因子的指示作用，其出现或消失并不能准确反映水环境或栖息地条件的自然变化，因而难以作为生态系统健康状况的有效指示。（2）从流域生态保护与管理的角度来看，土著鱼类不仅是水源涵养区生态完整性的重要组成部分，也是区域保护与管理的优先对象，因此基于土著鱼类建立的指示物种体系更具生态和管理意义。

1.3 鱼类功能性状的选择

本研究选取八个关键功能性状用于解析鱼类生态策略与环境适应机制：营养级（Trophic level）、口位（Mouth orientation）、栖息水层分布（Position in the water column）、洄游习性（Migratory behaviour）、流速偏好（Flow affinity）、最大体长（Maximum total length）和体长/体高（TL/BD）^[33]。其中营养级、最大体长、水层分布、洄游习性、流速偏好等功能性状数据来源于 Fishbase 数据库和已发表的文献，口位、体型（体长/体高）数据由野外观测和测量获得。

1.4 环境数据选择

为系统评估人类活动对黄河上游水生态系统的干扰强度，本研究选择与水电开发、水产养殖和人类活动密切相关的 6 个环境变量作为表征指标：水产养殖年限（年）、水库库容（ $\times 10^8 \text{m}^3$ ）、累积库容（ $\times 10^8 \text{m}^3$ ）、水库年龄（年）、大坝数量和人类干扰指数。库容、水库年龄、大坝数量和累积库容等环境变量数据来自青海省水利厅公布的公开普查数据，水产养殖年限数据来自青海省农业农村厅公开数据，人类干扰指数提取自数据集 CSP gHM: Global Human Modification。经过共线性分析后保留水库年龄、水产养殖年限、大坝数量和人类干扰指数四个环境变量。

1.5 方法构建与数据分析

本研究从以下四个方面构建分析框架，以筛选并验证能够有效指示黄河上游干流人类干扰强度的指示物种：

首先，基于物种分布数据进行决策曲线分析（Decision Curve Analysis, DCA），发现最大轴长度小于 4，说明表明物种响应以线性变化为主，因此我们采用冗余分析（Redundancy analysis, RDA）探究鱼类物种分布与环境变量之间的关系，对于鱼类物种分布存在显著影响的环境变量，进一步分析鱼类物种分布与该环境变量的相关关系，保留与至少一个环境变量呈显著负相关关系的物种作为指示物种候选物种。分析在 R 语言“vegan”包中完成。

其次，采用 RLQ 排序分析以整合环境变量（矩阵 R）、物种丰度数据（矩阵 L）与功能性状数据（矩阵 Q），以揭示环境因子与鱼类功能性状之间的对应关系，并利用四角分析（Fourth-corner analysis）进一步评估性状变量与环境变量之间的统计显著性^[34-36]，并将与环境变量具有显著相关关系的功能性状的前 50% 的物种作为进一步筛选依据。相关分析在 R 语言“ade4”包中完成。

综合 CCA、RLQ 和四角分析结果，筛选出与人类干扰强度显著负相关、功能性状受到显著干扰影响的土著鱼类，作为研究区域内的关键生态指示物种。

为进一步验证上述方法筛选出的指示物种的有效性，我们采用指示值分析法（Indicator Value Method, IndVal）对物种的指示性进行了定量评估。该方法结合了物种的专属性（specificity）与忠诚度（fidelity），

表 1 黄河上游鱼类物种名录

Tab.1 Fish list of the upper Yellow River

目 Order	科 Family	属 Genus	种 Species
鲤形目 Cypriniformes	鲈科 Balitoridae	花鲈属 <i>Cobitis</i>	北方花鲈 <i>Cobitis sibirica</i>
		北鲈属 <i>Lefua</i>	北鲈 <i>Lefua costata</i>
		泥鲈属 <i>Misgurnus</i>	泥鲈 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>
		副泥鲈属 <i>Paramisgurnus</i>	大鳞副泥鲈 <i>Paramisgurnus dabryanus</i>
		高原鲈属 <i>Triplophysa</i>	短尾高原鲈 <i>Triplophysa brevicauda</i>
			达里湖高原鲈 <i>Triplophysa dalaica</i>
			修长高原鲈 <i>Triplophysa leptosoma</i>
			东方高原鲈 <i>Triplophysa orientalis</i>
			黄河高原鲈 <i>Triplophysa pappenheimi</i>
			拟硬刺高原鲈 <i>Triplophysa pseudoscleroptera</i>
		硬刺高原鲈 <i>Triplophysa scleroptera</i>	
		拟鲈高原鲈 <i>Triplophysa siluroides</i>	
		细尾高原鲈 <i>Triplophysa stenura</i>	
		斯氏高原鲈 <i>Triplophysa stoliczkai</i>	
	鲤科 Cyprinidae	棒花鱼属 <i>Abbottina</i>	棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>
		刺鲃属 <i>Acanthogobio</i>	刺鲃 <i>Acanthogobio guentheri</i>
		鲮属 <i>Acanthorhodeus</i>	兴凯鲮 <i>Acanthorhodeus chankaensis</i>
		鲫属 <i>Carassius</i>	鲫 <i>Carassius auratus</i>
		黄河鱼属 <i>Chuanchia</i>	骨唇黄河鱼 <i>Chuanchia labiosa</i>
		鲤属 <i>Cyprinus</i>	鲤 <i>Cyprinus carpio</i>
		镜鲤 <i>Cyprinus carpio</i> L.	
裸鲤属 <i>Gymnocypris</i>		花斑裸鲤 <i>Gymnocypris eckloni</i>	
裸重唇鱼属 <i>Gymnodiptychus</i>		厚唇裸重唇鱼 <i>Gymnodiptychus pachycheilus</i>	
雅罗鱼属 <i>Leuciscus</i>		黄河雅罗鱼 <i>Leuciscus chuanchicus</i>	
扁咽齿鱼属 <i>Platypharodon</i>		极边扁咽齿鱼 <i>Platypharodon extremus</i>	
麦穗鱼属 <i>Pseudorasbora</i>		麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	
鲮属 <i>Rhodeus</i>		中华鲮 <i>Rhodeus sinensis</i>	
裸裂尻鱼属 <i>Schizopygopsis</i>		黄河裸裂尻鱼 <i>Schizopygopsis pylzovi</i>	
裂腹鱼属 <i>Schizothorax</i>		齐口裂腹鱼 <i>Schizothorax prenanti</i>	
鲇形目 Siluriformes	鲇科 Siluridae	鲇属 <i>Silurus</i>	鲇 <i>Silurus asotus</i>
	鲿科 Bagridae	拟鲿属 <i>Pseudobagrus</i>	中臀拟鲿 <i>Pseudobagrus medianalis</i>
鲈形目 Perciformes	塘鳢科	黄魮鱼属 <i>Micropercops</i>	黄魮 <i>Micropercops swinhonis</i>
	Odontobutidae		
	鰕虎鱼科 Gobiidae	吻鰕虎鱼属 <i>Rhinogobius</i>	子陵吻鰕虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>
鲑形目 Osmeriformes	胡瓜鱼科 Osmeridae	公鱼属 <i>Hypomesus</i>	池沼公鱼 <i>Hypomesus olidus</i>
	鲑科 Salmonidae	太平洋鲑属 <i>Oncorhynchus</i>	虹鳟 <i>Oncorhynchus mykiss</i>

表 2 物种与环境变量相关性分析结果
Tab.2 Species-Environment Correlation Results

物种	拉丁文	水产养殖年限 (年)	人类干扰指数	大坝数量	水库年龄 (年)
骨唇黄河鱼	<i>Chuanchia labiosa</i>	-0.7912	-0.9963	-0.7675	-0.8383
花斑裸鲤	<i>Gymnocypris eckloni</i>	-0.9955	-0.7965	--	-0.9999
厚唇裸重唇鱼	<i>Gymnodiptychus pachycheilus</i>	-0.6566	-0.9939	-0.8779	-0.7158
极边扁咽齿鱼	<i>Platypharodon extremus</i>	-0.7897	-0.9965	-0.7691	-0.8370
黄河裸裂尻鱼	<i>Schizopygopsis pylzovi</i>	-0.9860	-0.6126	--	-0.9692
修长高原鳅	<i>Triplophysa leptosoma</i>	-0.4712	--	--	--
黄河高原鳅	<i>Triplophysa pappenheimi</i>	-0.7929	--	--	-0.7407
拟硬刺高原鳅	<i>Triplophysa pseudoscleroptera</i>	-0.6068	--	--	-0.5401
拟鲃高原鳅	<i>Triplophysa siluroides</i>	-0.4657	-0.9419	-0.9644	-0.5361
斯氏高原鳅	<i>Triplophysa stoliczkai</i>	-0.8848	-0.9666	-0.6455	-0.9198

2.3 鱼类功能性状与环境变量的关系

RLQ 分析结果显示，鱼类最大体长与大坝数量及人类干扰指数呈负相关（图 3）。这表明体型越大的物种在干扰强度较高的区域中的分布越是受限，反映了其对环境扰动的敏感性。

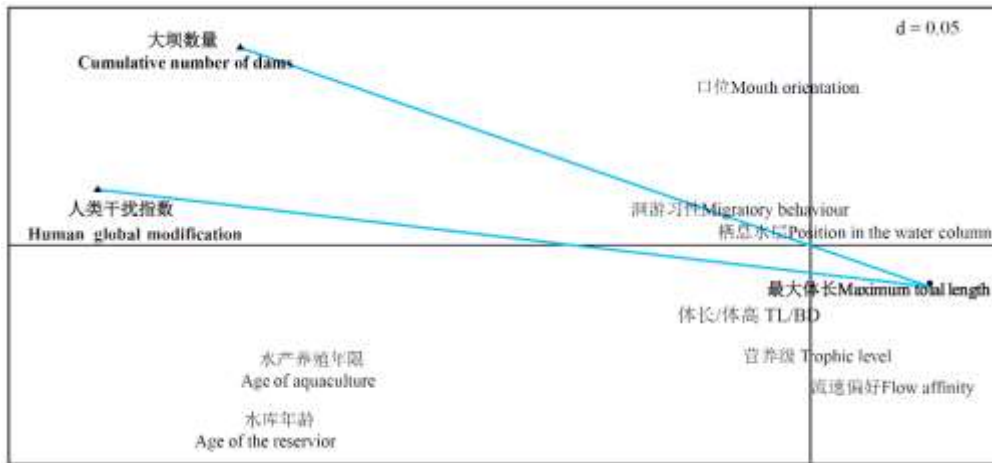


图 3 基于环境因子与物种功能性状的 RLQ 分析排序

Fig 3. RLQ analysis based on environmental variables and species functional traits

我们将最大体长为前 50% 的指示种候选物作为最终选定的指示物种，共有骨唇黄河鱼、花斑裸鲤、厚唇裸重唇鱼、极边扁咽齿鱼、黄河裸裂尻鱼和拟鲃高原鳅 6 种鱼类。

2.4 指示值分析验证结果

指示值分析结果表明：在筛选出的 6 种指示鱼类中，骨唇黄河鱼、厚唇裸重唇鱼、极边扁咽齿鱼、黄河裸裂尻鱼和拟鲃高原鳅 5 种鱼类均表现出显著的指示作用（表 3），验证了筛选结果的可靠性。但花斑裸鲤的分组指示作用不显著，可能与其较广的分布范围有关和较强的环境适应能力有关。相较于其他对特定生境依赖性较强的物种，花斑裸鲤在不同生境组间均有分布，尽管其在部分样点或局部环境中仍具有良好的生态响应特征，但在群组尺度上的指示作用被削弱。这一结果也表明，基于环境梯度与功能性状相结合的筛选方法不仅能够识别对特定生境高度依赖的狭域专性种，也能捕捉在样点尺度对微环境变化敏感的广适性物种，从而增强了指示种筛选的全面性与适用性。

表 3 物种指示值分析结果 (** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$)

Tab.3 Results of Indicator Value (IndVal) Analysis (** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$)

物种 species	IndVal
骨唇黄河鱼 <i>Chuanchia labiosa</i>	0.41**
花斑裸鲤 <i>Gymnocypris eckloni</i>	0.25
厚唇裸重唇鱼 <i>Gymnodiptychus pachycheilus</i>	0.58***
极边扁咽齿鱼 <i>Platypharodon extremus</i>	0.65***
黄河裸裂尻鱼 <i>Schizopygopsis pylzovi</i>	0.48***
拟鲌高原鳅 <i>Triplophysa siluroides</i>	0.37**

2.5 指示物种筛选结果

综合 RDA 分析、RLQ 分析与指示值验证分析结果，最终筛选出六种对人类活动干扰具有敏感响应的土著鱼类，作为黄河上游干流的指示物种，分别为：骨唇黄河鱼、花斑裸鲤、厚唇裸重唇鱼、极边扁咽齿鱼、黄河裸裂尻鱼和拟鲌高原鳅。

2.6 指示物种分布与环境变量的关系

利用随机森林模型分析了指示物种分布与环境变量之间的关系，发现：水库年龄、水产养殖年限以及大坝数量是与指示物种缺失显著相关的重要环境变量 ($p < 0.01$) (图 4a)；指示物种出现主要受到水库年龄的显著影响 ($p < 0.05$)，人类干扰指数虽然在变量重要性分析中占据次要位置，但其在排列检验中未达到统计显著水平 ($p > 0.05$) (图 4a)，另外水产养殖年限对指示物种出现也存在显著影响。具体而言，随着水库年龄和水产养殖年限的增加，指示物种缺失的概率显著上升，指示物种出现的概率也显著下降，水库年龄超过 10 年左右时，指示物种出现频率显著下降 (图 4b)。

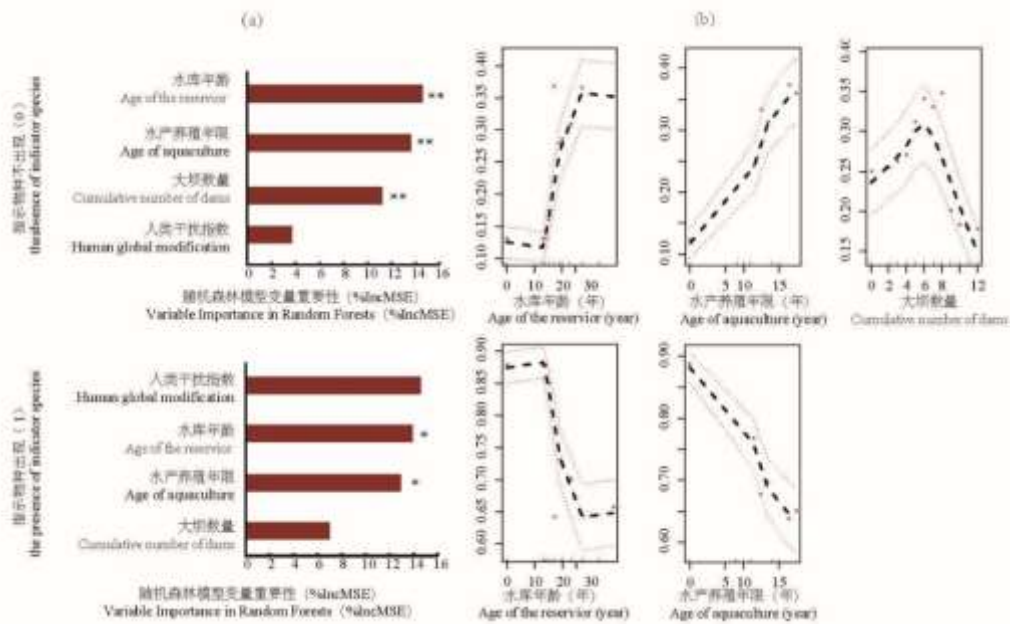


图 4 基于随机森林模型分析：不同人类干扰因子对指示种出现与缺失的影响 (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$)

Fig.4 Random Forest-Based Analysis: Effects of different anthropogenic disturbance factors on the presence and absence of indicator species (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$)

3 讨论

本研究构建了“物种分布-功能性状”的筛选框架，系统整合了环境关联分析 (RDA) 与功能响应验证

(RLQ)相结合的筛选方法,并利用 IndVal 对筛选结果进行了验证。这一综合方法体系有效地实现了从“识别与环境变化协同变化的物种”到“阐释其功能性状响应机制”,再到“独立验证其指示特异性”的递进筛选。RDA 用于解析物种分布格局与人类干扰之间的直接关联,物种与各环境变量之间的相关性分析能够客观筛选出对某一或多个环境变量具有显著响应的物种作为指示物种候选物种。RLQ 分析进一步揭示了环境梯度与功能性状之间的耦合关系,反映了环境变化对鱼类关键性状(如最大体长)的选择压力,使筛选过程能够反映物种生态适应机制。研究结果显示,鱼类体型大小与大坝数量、人类干扰指数呈显著负相关关系,这一趋势揭示了水电开发导致的栖息地破碎化和水文连通性下降,对大型、迁移性强的物种构成了选择性压力,使群落结构逐渐向小型、定居性鱼类偏移。这种基于功能性状与环境变量耦合关系的筛选方法,不仅突破了传统方法仅依赖物种数量变化的局限,更为深入地揭示了人类干扰如何通过改变关键生态位性状而重塑群落结构与功能。IndVal 可以量化各物种在干扰梯度下的特异性响应,但其对生态功能或因果机制未做分析,我们将其作为一个验证方法,从统计学的角度再次验证筛选结果的可靠性。因此,本研究提出的框架可筛选出生态指示性更强、机制解释更充分的指示物种,在高寒河流生态监测中具有更高的生物学解释力与适应性。

本研究筛选出的黄河上游鱼类指示物种展现出了显著的生态适配性和生境指示价值。研究中筛选出的六种指示鱼类广泛分布于黄河上游区域,生态位覆盖范围广,功能性状差异显著,涵盖多类栖息策略,能较为全面地反映水生生态系统的结构与功能状态。此外,这些鱼类均为黄河上游的代表性或特有物种,长期进化过程中已高度适应高原型河流生态环境,对环境变化尤其是人为干扰表现出显著的响应特性。研究结果表明指示物种的分布受到水电开发、水产养殖以及人类干扰指数等多种人类干扰变量的影响。水电工程运行导致的水文节律改变、水温结构重塑以及栖息地连通性破坏,对区域内指示物种产生显著影响,其分布范围与资源密度均呈现出明显缩减趋势^[43]。例如,骨唇黄河鱼的分布范围已由拉西瓦段缩减至羊曲及以上河段,极边扁咽齿鱼分布范围亦由拉西瓦河段缩减至羊曲及以上区域;厚唇裸重唇鱼和拟鲇高原鳅原广泛分布于全流域,现仅分布于龙羊峡及以上水域和龙羊峡以下局部区域;而黄河裸裂尻鱼和花斑裸鲤虽然在流域内仍有分布,但自然资源密度显著下降^[26,27,44]。水产养殖也是影响指示物种分布的重要因素。黄河上游是我国著名的冷水鱼养殖基地,水产养殖是外来种引入的重要途径,加之水库的修建使得河流形态由流水变为静水环境,适宜外来鱼类的生存和繁殖,外来鱼类与土著鱼类竞争生存空间,指示物种出现频率逐渐下降^[45]。指示物种在空间分布上表现出的收缩趋势,不仅是群落对局地干扰的被动响应,也体现了黄河上游生态系统功能退化的早期信号。而从生态风险角度看,指示物种的持续退缩还预示了黄河上游外来种替代和生态安全隐患的扩大,这一结果为区域鱼类多样性保护与外来种防控提供了预警依据。

本研究的另一重要贡献在于提出了一种可推广的“分布-性状-干扰”三维指示框架,能够系统解析物种响应机制及其在群落功能结构中的生态位置转变。该框架相较于传统的单一维度方法,不仅能识别显著响应物种,还能揭示其生态功能与干扰敏感性之间的因果联系。该框架为区域生态监测体系优化和生物多样性保护策略制定提供了多维度、科学化的决策依据与技术支撑。黄河上游地处青藏高原,其生态系统特征具有显著的流域代表性。该框架在此地的应用验证了其在高原型河流生态系统中的可行性与解释力,为探索生态监测指标区域化与机制化奠定了基础。其鱼类区系组成、生态环境特征和人类干扰背景也存在于青藏高原的其他水系中,例如三江源作为长江、黄河和澜沧江的发源地,是我国生态安全的重要屏障和生物多样性重点保护地区之一,其水系结构复杂,生态环境脆弱,近年来也面临着水利开发、气候变化等多重压力^[46,47]。因此,本研究所建立的指示物种“筛选-验证”框架也可为三江源及青藏高原其他流域的生态监测指标体系构建、生境健康评估及流域保护管理实践提供方法借鉴与技术支撑。在此基础上,未来研究可进一步探索该框架在不同地理单元和水生态系统中的适应能力与推广路径,推动区域生态监测与生物保护工作的系统化与科学化发展。

4 参考文献

- [1]Landres P B, Verner J, Thomas J W. Ecological uses of vertebrate indicator species: a critique. *Conservation biology*, 1988, 2(4): 316-328.
- [2]Wang M, Tan J, Sha CY, et al. Advances in assessment of ecosystem health and indicator species method. *China Population Resources*

- and Environment*, 2012, 22(S1): 69-72. [王敏, 谭娟, 沙晨燕, 等. 生态系统健康评价及指示物种评价法研究进展. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(S1): 69-72.]
- [3]De Cáceres M. How to use the indicpecies package (ver. 1.7. 1). R Proj, 2013, 29: 1-29.
- [4]Gilby BL, Olds AD, Connolly RM, et al. Umbrellas can work under water: Using threatened species as indicator and management surrogates can improve coastal conservation. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2017, 199: 132-140.
- [5]Bölscher T, Van Slobbe E, Van Vliet M T H, et al. Adaptation turning points in river restoration? The Rhine salmon case. *Sustainability*, 2013, 5(6): 2288-2304.
- [6]贾银涛. 基于鱼类的东江上游及增江河流健康评价研究[学位论文]. 武汉: 中国科学院研究生院, 2010: 77-103.
- [7]Carignan V, Villard MA. Selecting indicator species to monitor ecological integrity: a review. *Environmental monitoring and assessment*, 2002, 78: 45-61.
- [8]Roberts TH, O'Neil LJ. Species selection for habitat assessments. 1985.
- [9]Hill MO, Bunce RGH, Shaw MW. Indicator species analysis, a divisive polythetic method of classification, and its application to a survey of native pinewoods in Scotland. *The Journal of Ecology*, 1975: 597-613.
- [10]Hill M. TWINSPLAN: a FORTRAN program of arranging multivariate data in an ordered two way table by classification of individual and attributes. *Ithaca, NY: Cornell University.*, 1979.
- [11]Hutto RL. On the importance of stopover sites to migrating birds. *The Auk*, 1998, 115(4): 823-825.
- [12]Dufrêne M, Legendre P. Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological monographs*, 1997, 67(3): 345-366.
- [13]Newman SJ, Brown JI, Fairclough DV, et al. A risk assessment and prioritisation approach to the selection of indicator species for the assessment of multi-species, multi-gear, multi-sector fishery resources. *Marine Policy*, 2018, 88: 11-22.
- [14]Mims MC, Olden JD. Life history theory predicts fish assemblage response to hydrologic regimes. *Ecology*, 2012, 93(1): 35-45.
- [15]Fitzpatrick KB, Moody AT, Milt A, et al. Can indicator species guide conservation investments to restore connectivity in Great Lakes tributaries?. *Biodiversity and Conservation*, 2021, 30: 165-182.
- [16]沈红保, 李科社, 张敏. 黄河上游鱼类资源现状调查与分析. *河北渔业*, 2007, (06): 37-41.
- [17]Li WS, Wu GX. Source and Composition of Water and Sediment in Upper Reaches of the Yellow River in Qinghai Province. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1999, 19(6): 5. [李万寿, 吴国祥. 青海省境内黄河上游区水沙来源及组成分析. 水土保持通报, 1999, 19(6): 5.]
- [18]Wu YF, Wu CZ. Fish Fauna and Zoogeographical Analysis of the Yellow River in Qinghai Province. *Acta Biologica Plateau Sinica*, 1987, 7: 141-153. [武云飞, 吴翠珍. 青海省黄河鱼类及其区系分析. 高原生物学集刊, 1987, 7: 141-153.]
- [19]Zhao YH, Xing YC, Lv BB, et al. Species diversity and conservation of freshwater fishes in the Yellow River basin. *Biodiversity Science*, 2020, 28(12): 1496. [赵亚辉, 邢迎春, 吕彬彬, 等. 黄河流域淡水鱼类多样性和保护. 生物多样性, 2020, 28(12): 1496.]
- [20]Tang WJ, Shen ZX, Jian S L, et al. Protection measures for rare and endangered fish species of the Yellow River in Qinghai Province. *Reservoir Fisheries*, 2006, 26(1): 57-60. [唐文家, 申志新, 简生龙. 青海省黄河珍稀濒危鱼类及保护对策. 水利渔业, 2006, 26(1): 57-60.]
- [21]Chen F, Yuan T, Xiong MT, et al. Fish Diversity Investigation in the Three-River Headwater Region and Strategies for Conservation. *Journal of Hydroecology*, 2024, 45(05): 1-8. [陈锋, 袁婷, 熊满堂等. 三江源区鱼类多样性调查及保护对策. 水生态学杂志, 2024, 45(05): 1-8].
- [22]Jiang ZG, Jiang JP, Wang YZ, et al. Red List of China's Vertebrates. *Biodiversity Science*, 2016, 24(5): 500-551. [蒋志刚, 江建平, 王跃招, 等. 中国脊椎动物红色名录. 生物多样性, 2016, 24(5): 500-551.]
- [23]钱玉杰. 我国水电的地理分布及开发利用研究[学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2013: 32-43.
- [24]Xinhua News Agency. Outline of the 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development of the People's Republic of China and the Long-Range Objectives Through the Year 2035. *China Water Resources*, 2021, 72(6): 1-38. [新华社. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要. 中国水利, 2021, 72(6): 1-38.]

- [25]Jia YT, Zhuo Y, Cardoso P, et al. Loss and Gain: Temporal Succession in Different Facets of Fish Diversity Over a Half Century Under Cascade Dam Construction. *Fish and Fisheries*, 2025,26(3): 356-371.
- [26]Zhang JJ, Feng H, Li KS, et al. Changes of fishery resources after the construction of cascade hydropower stations from Longyang gorge in upper stream of Yellow River. *Freshwater Fisheries*, 2009, 39(03): 40-45. [张建军, 冯慧, 李科社等. 黄河上游龙羊峡至刘家峡河段梯级水电站建设后鱼类资源变化. *淡水渔业*, 2009, 39(3): 40-45.]
- [27]卓玉. 梯级水电开发对黄河上游鱼类多维度 α 多样性的影响[学位论文]. 拉萨: 西藏大学, 2024.
- [28]Jia Y, Zhu H, Xie T, Xiong X, et al. From source to lake: Multi-taxon alpha and beta diversity patterns along a river above 4500 m AMSL on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Water Biology and Security*, 2024. 3(4), 100294.
- [29]Zhuo Y, Li JL, Li YQ, et al. Spatial distribution pattern of fish multifaceted biodiversity in the Longyangxia Reservoir. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, 48(03): 504-512. [卓玉, 李钧乐, 李英钦等. 龙羊峡水库鱼类多维多样性空间分布格局. *水生生物学报*, 2024, 48(3): 504-512.]
- [30]李思忠. 黄河鱼类志. 中国台湾: 水产出版社, 2015: 71- 402.
- [31]Z 朱松泉. 中国淡水鱼类检索. 南京: 江苏科学技术出版社, 1995: 8-187.
- [32]Z 朱松泉. 中国条鳅志. 南京: 江苏科学技术出版社, 1989: 1-135.
- [33]Cheng XY, Tao J, Wu R D, et al. Functional ecology of freshwater fish: research progress and prospects. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(3): 810-822. [程馨雨, 陶捐, 武瑞东等. 淡水鱼类功能生态学研究进展. *生态学报*, 2019, 39(03): 810-822.]
- [34]Dolédéc S, Chessel D, Ter Braak C J F, et al. Matching species traits to environmental variables: a new three-table ordination method. *Environmental and Ecological Statistics*, 1996, 3: 143-166.
- [35]Dray S, Choler P, Dolédéc S, et al. Combining the fourth-corner and the RLQ methods for assessing trait responses to environmental variation. *Ecology*, 2014, 95(1): 14-21.
- [36]Dray S. A tutorial to perform fourth-corner and RLQ analyses in R. *dim (aravo \$ spe)*, 2013, 1(75): 82.
- [37]Sun ZQ, Zhang XY, Zhu YP, et al. Applications of species indicator for analyzing plant community types and their biodiversity at Kunyushan National Forest Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(11): 3120-3132. [孙志强, 张星耀, 朱彦鹏等. 应用物种指示值法解析崑崙山植物群落类型和植物多样性. *生态学报*, 2011, 31(11): 3120-3132.]
- [38]Li YY, Zhang DZ. Preliminary screening for darkling beetles as bioindicators in desert habitat. *Ecological Science*, 2016, 35(01): 67-74. [李迎运, 张大治. 荒漠生境拟步甲科指示性昆虫的初步筛选. *生态科学*, 2016, 35(01): 67-74.]
- [39]RColorBrewer S, Liaw M A. Package 'randomforest'. *University of California, Berkeley: Berkeley, CA, USA*, 2018.
- [40]Evans JS, Murphy MA. Package 'rfUtilities'. *R Core Team: Vienna, Austria*, 2019.
- [41]Ishwaran H, Kogalur UB, Kogalur MUB. Package 'randomForestSRC'. *breast*, 2022, 6(1).
- [42]Ehrlinger J. ggRandomForests: random forests for regression. *arXiv preprint arXiv:1501.07196*, 2016.
- [43]Jia YT, Zhuo Y, Cardoso P, et al. Loss and Gain: Temporal Succession in Different Facets of Fish Diversity Over a Half Century Under Cascade Dam Construction. *Fish and Fisheries*, 2025, 3(26): 356-371.
- [44]Tang WJ, He DK. Fish resource survey on Cihaxia to Jishixia stretches in the upper reaches of Yellow River (2005-2010). *Journal of Lake Sciences*, 2013, 25(04): 600-608. [唐文家, 何德奎. 黄河上游茨哈峡至积石峡段鱼类资源调查(2005-2010年). *湖泊科学*, 2013, 25(4): 600-608.]
- [45]Tang WJ, He DK. Investigation on alien fishes in Qing hai Province, China (2001-2014). *Journal of Lake Sciences*, 2015, 24(3): 502-510. [唐文家, 何德奎. 青海省外来鱼类调查(2001-2014年). *湖泊科学*, 2015, 24(3): 502-510.]
- [46]Wu YF, Tan QJ. Characterisycs of the fish-fauna of the characteristics of Qinghai-Xizang Plateau and its geological distribution and formation. *Current Zoology*, 1991, 37(2): 135-152. [武云飞, 谭齐佳. 青藏高原鱼类区系特征及其形成的地史原因分析. *动物学报*, 1991, 37(2): 135-152.]
- [47]Li KM. Assessment of the impacts of hydraulic engineering on aquatic organisms and recommendations for fish propagation and conservation in the Three-River Headwater Region. *China Fisheries*, 2007(12): 72-73. [李柯懋. 三江源区水利工程对水生生物影响评价和鱼类增殖保护建议. *中国水产*, 2007 (12): 72-73.]