

# 基于纵向水文连通的黄河中下游鱼类生境恢复潜力分析

孙德鑫<sup>\*#</sup>, 刘超利

烟台大学土木工程学院, 山东 烟台

收稿日期: 2026年3月5日; 录用日期: 2026年4月10日; 发布日期: 2026年4月24日

## 摘要

黄河作为中国第二大河与华北核心生态廊道, 其半干旱气候与高强度人类活动造成巨大生态压力。中下游纵向水文连通性较自然状态急剧下降16倍, 导致河道断流、生境破碎化及生物多样性锐减。尽管小浪底工程通过调水调沙显著调控水沙, 生态修复仍面临防洪-供水-生物保护的多目标协同难题。本研究聚焦水库拦截及水沙调控对黄河中下游水文连通及鱼类生境的影响, 选择白浪渡口-高村河段进行季节性水环境及水生生态分析(35个点位), 建立基于水文连通性的鱼类生境恢复潜力评价体系。本文选取耐受性黄河鲤鱼(成鱼/产卵期)和敏感种刀鲚(成鱼期)为指标, 并识别流速、水深等8个关键纵向水文连通因子, 进而构建鱼类生境恢复潜力(SI)评价模型。结果显示耐受性鱼类物种生境恢复潜力显著高于敏感性物种(两季成鱼期 $SI > 0.7$ )。同一物种不同阶段潜力差异悬殊。季节影响上, 鲤鱼成鱼期春季更优, 产卵期则秋季潜力更高。空间分布: 小浪底大坝下游段整体优秀(各期 $SI > 0.7 > 78%$ ); 夹河滩段退化严重——鲤鱼成鱼期适生段仅占34%, 且河弯子段( $SI < 0.5$ )碎片化严重, 极低纵向连通度阻碍了刀鲚等洄游通道。本研究为多目标约束下的黄河水文连通修复与鱼类生境恢复提供了关键模型支撑。

## 关键词

黄河中下游, 纵向水文连通, 生境恢复潜力, 生境适宜度, 鱼类

## Analysis of Fish Habitat Restoration Potential in the Middle and Lower Reaches of the Yellow River Based on Longitudinal Hydrological Connectivity

Dexin Sun<sup>\*#</sup>, Chaoli Liu

School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai Shandong

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 孙德鑫, 刘超利. 基于纵向水文连通的黄河中下游鱼类生境恢复潜力分析[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(4): 530-540. DOI: 10.12677/aep.2026.164053

Received: March 5, 2026; accepted: April 10, 2026; published: April 24, 2026

## Abstract

As the second longest river in China, the Yellow River serves as a key ecological corridor in North China but is under substantial ecological pressure from its semi-arid climate and intensive human activities. Longitudinal hydrological connectivity in the middle and lower reaches has declined by approximately sixteenfold relative to natural conditions, leading to flow interruption, habitat fragmentation, and biodiversity loss. Although the Xiaolangdi Project has substantially altered flow and sediment regimes through water-sediment regulation, ecological restoration remains constrained by trade-offs among flood control, water supply, and biodiversity conservation. This study evaluates the effects of reservoir interception and water-sediment regulation on longitudinal hydrological connectivity and fish habitats in the middle and lower Yellow River. The Bailangdu-Gaocun reach was selected for seasonal analyses of water environmental and aquatic ecological conditions based on monitoring data from 35 sampling sites, and an evaluation framework for fish habitat restoration potential was established. A tolerant species, Yellow River carp (*Cyprinus carpio*, adult and spawning stages), and a sensitive migratory species, *Coilia nasus* (Chinese tapertail anchovy, adult stage), were selected as indicator species. Eight key indicators of longitudinal hydrological connectivity were identified, and a habitat restoration potential index (SI) was constructed by integrating habitat suitability functions with these indicators. Results indicate that tolerant fish species exhibit significantly higher habitat restoration potential than sensitive species, with SI values exceeding 0.7 for adult stages in both seasons. Habitat restoration potential differed markedly among life stages of the same species. In terms of seasonal influence, the adult stage of carp shows better potential in spring, while the spawning stage shows higher potential in autumn. In spatial distribution, the downstream section of the Xiaolangdi Dam performs overall well (SI > 0.7 in all stages, accounting for more than 78%), whereas the Jiahetan section is severely degraded—only 34% of suitable habitat remains for adult carp, and the Hewanzi section (SI < 0.5) exhibits severe fragmentation. Extremely low longitudinal connectivity obstructs migratory pathways for species such as *Coilia nasus*. This study provides a quantitative framework to support hydrological connectivity restoration and fish habitat recovery in the Yellow River under multi-objective management constraints.

## Keywords

Middle and Lower Reaches of the Yellow River, Longitudinal Hydrological Connectivity, Habitat Restoration Potential, Habitat Suitability, Fish

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

黄河作为我国北方重要的水资源命脉和生态系统廊道,其河流纵向水文连通性是物质、能量流动及生物迁移的核心功能基础[1][2]。水文连通性概念体系的发展经历了从简单结构描述到多功能整合的演进过程。早期的“河流连续体”理论[3]主要关注河流纵向的物质能量传输,而现代研究则将其拓展为包含横向、纵向和垂向的三维系统[1][4]。近年来的研究特别强调功能连通性和过程连通性的概念区分[5][6],这种理论发展为量化评估生态响应提供了新的分析框架。气候变化与人类活动的双重胁迫构成了黄河水文连通性改变的根本驱动力。在时间尺度上,有研究指出降水-径流关系的长期改变会重塑流域水文情

势[7]; 弗林德斯河流域的案例研究则证明, 水文连通性对干旱事件的响应存在显著的非线性特征[8]。就空间格局而言, 梯级水电开发造成的纵向分割效应尤为突出: 塔霍河流域的研究量化了大型水坝建设导致的连通度下降[9]; 黄河中下游的研究更是揭示出连通性指数呈现数量级的衰减(下降 16 倍) [10]。

这种空间异质性变化背后隐含着复杂的驱动机理。通过将遥感监测[11]与水文模型[12]相结合的研究发现, 黄河干流不同河段对外部胁迫的敏感性存在显著差异: 三门峡至小浪底段对水电开发的响应最为敏感, 而花园口以下河段则主要受引水工程影响[13]。多维度分析方法[14]为揭示上述复杂模式提供了有力工具。水文连通性改变对鱼类群落的直接影响表现在多个生态组织层次上。在个体水平, 洄游性鱼类(如黄河鲤鱼)的迁移行为受阻会导致生长和繁殖异常[15]; 在种群水平, 隔离效应加速了近交衰退和遗传多样性损失[16]; 在群落层面, 黄河中下游鱼类资源量监测结果显示, 2000~2020 年间物种数减少了 33%, 生物量下降了 52% [17]。

生态响应评估方法的发展体现出多指标融合的趋势。传统的生物完整性指数(IBM)经过不断优化, 逐渐融入功能性状分析[18]和网络模型[19]等新元素。这些方法创新提高了对系统非平衡态变化的识别能力。但同时也应注意到, 不同方法在黄河流域的适用性存在显著差异[20], 这种差异在很大程度上源于流域内空间异质性的叠加效应。当前研究面临的核心问题是如何理解多重胁迫的协同效应。水文连通性的研究正从单一驱动分析向耦合系统模拟转变[21], 最新进展包括开发了考虑气候变化-人类活动-生态系统反馈的集成模型[22]。然而这些模型在表征生物适应过程(如鱼类行为响应)时仍显不足[23]。

本研究以黄河中下游核心河段为研究对象, 依据水文连通性核心理论[2], 结合实地采样与过程模拟方法, 系统解析纵向水文连通性对鱼类生境的影响机理。具体目标包括: ① 基于春、秋两季 35 个采样点(覆盖干流 12 处、支流 2 处及水库 11 处)的实测数据(流速、溶氧、含沙量等 15 项指标[24]), 识别纵向水文连通关键因子; ② 利用自主开发的 CURrents 模型, 集成模糊数学与 GIS 空间分析技术, 构建包含水文(流速、流量)、水质(溶氧、化学需氧量)及地貌(河岸带宽度、底质类型)的 8 个因子四段式生境适宜度模型[25]; ③ 通过对比小浪底坝下、夹河滩等重点河段的时空分异特征[26], 结合黄河无干扰区自然基准验证模型的可靠性[27], 揭示黄河中下游鱼类生境恢复潜力的空间分布规律。研究结果可为黄河生态流量调控和鱼类洄游通道修复提供科学依据, 助力黄河流域生态保护和高质量发展战略实施。

## 2. 数据资料

### 2.1. 数据概况

本研究选取黄河中下游白浪渡口至高村河段, 全长约 450 km, 该河段跨越河南、山东两省, 贯穿多个国控断面。该区域地处中纬度季风气候区, 气温自西向东递增, 年较差大(21℃~31℃), 无霜期超过 200 天, 远高于上游不足 20 天的无霜期。受季风影响, 该河段径流季节差异显著, 年内分配不均, 汛期(7~10 月)径流量占全年 60%左右, 而枯水期(3~6 月)仅占 10%~20%。此外, 该河段沙源丰富, 易发生沙尘和扬沙天气, 水资源稳定性较差, 枯水期较长, 给水资源利用带来挑战。

黄河中下游泥沙问题尤为突出, 含沙量处于较高水平。中游流经黄土高原, 土质松散、植被稀疏, 雨水冲刷导致严重水土流失。流域平均含沙量达 37.8 kg/m<sup>3</sup>, 汛期(7~10 月)集中了全年 60%的水量和 80%的泥沙输送量。为应对河流多沙、河道淤积等问题, 相关部门采取了加固堤防、河道整治等措施。尽管这些人工干预虽然短期内维持了河道的相对稳定, 但也改变了自然水文过程, 削弱了纵向水文连通性, 影响了鱼类多样性, 加剧了水环境问题。

### 2.2. 数据来源与处理

为评估黄河中下游水文连通性对鱼类生境的影响, 本研究首先通过多种途径收集了水文(如水位、流

量、含沙量)、气象、水生态(鱼类分布、浮游生物)及遥感(土地利用、植被覆盖)等多维度数据, 并利用 ArcGIS 整合水利工程(如水库、大坝、排污口)空间信息, 构建水文连通结构图, 以识别关键胁迫区域。

针对水文连通性影响因子, 研究从水质(如溶解氧、营养盐)、水文(流量波动、水体连续性)及河床地貌(底质类型、河道形态)3 个层面筛选关键指标, 并参考相关文献、鱼类志及专家意见, 将各因子的适宜范围划分为高、中、低 3 个等级区间, 为后续量化分析提供依据。该综合方法旨在识别制约鱼类生境恢复的关键连通性障碍, 为生态修复策略制定提供支撑。

## 2.3. 数据采集

### 2.3.1. 采样点布设

研究区范围及采样点空间分布见图 1。根据黄河水文站分布、河岸护坡类型及植被覆盖情况, 对黄河中下游河段进行划分, 共设置 35 个采样点。其中, 黄河中下游干流设置 12 个采样点; 小浪底水库库区(全长约 50 km)每 5 km 设置 1 个采样点, 共 9 个; 小浪底下游约 10 km 河段每 2 km 设置 1 个采样点, 共 7 个; 夹河滩段(约 10 km)每 2 km 设置 1 个采样点, 共 5 个; 畛河支流段设置 2 个采样点。

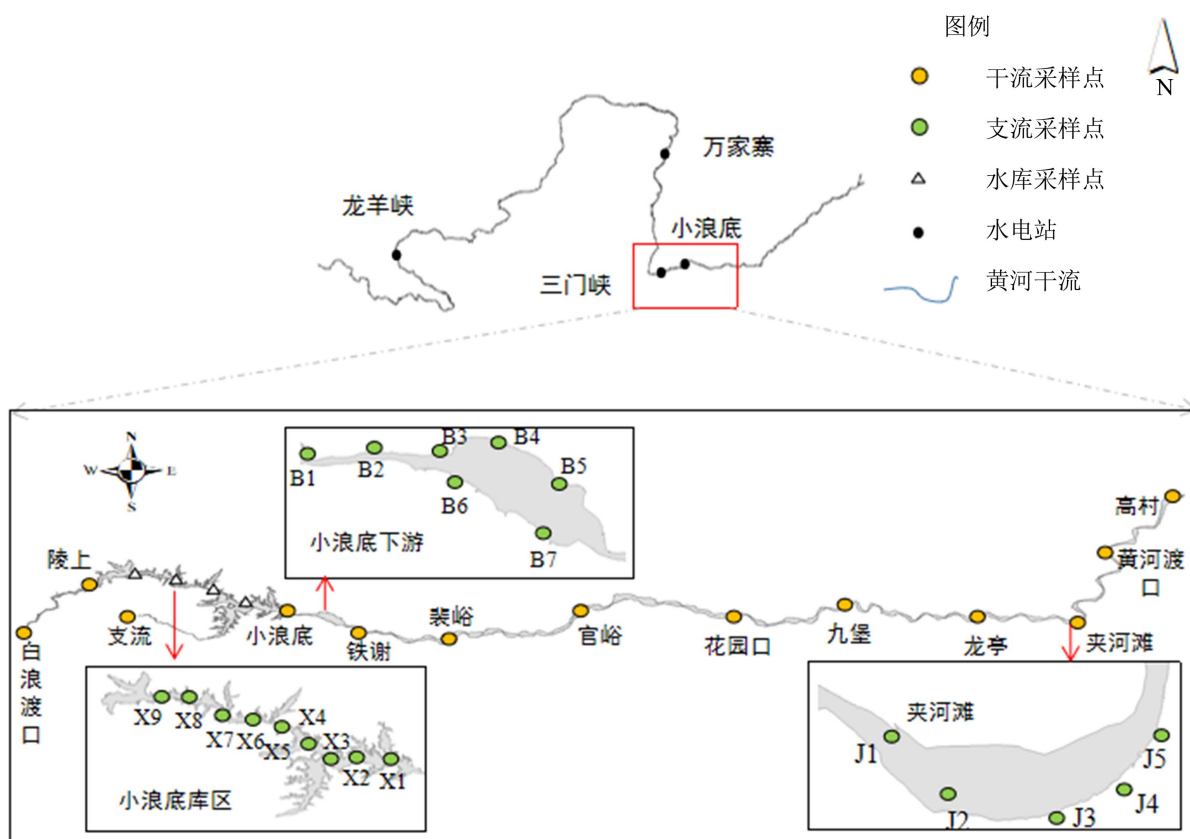


Figure 1. Large-scale research area  
图 1. 大尺度调研区域

### 2.3.2. 采样与分析

实地调研过程中, 采样、检测、保存及分析均按照《地表水环境质量标准》和《生活饮用水标准检验方法》等国家标准进行。对 35 个采样点分别进行了 15 个指标的分析, 包括流速、浊度、水深、水温、pH、溶解氧(DO)、总氮、总磷、氨氮和化学需氧量(COD)等。

### 2.3.3. 数据处理与模型构建

基于 ArcGIS 平台, 研究对黄河中下游河段进行了空间数据处理与分析, 包括河段划分、数据整合及运算, 为后续模型构建提供了空间基础。进一步利用课题组自主研发的河流生态健康评价模型(CURrents), 结合模糊数学模拟方法, 建立了面向鱼类生境恢复潜力的纵向水文连通度评价体系。该模型通过水质(如溶解氧、营养盐)、水文(流量波动、水体连续性)及河床地貌(底质类型、河道形态)等关键因子, 量化评估鱼类生境的适宜性及其恢复潜力。

模糊规则(fuzzy rule)的建立以构建鱼类生境恢复潜力评价模型为核心。研究选取黄河鲤鱼(成鱼期、产卵期)和刀鲚(成鱼期)为指标鱼类, 依据文献、专家知识及白浪渡口 - 高村河段 35 个采样点的实地调研数据, 确定水质(DO, NH<sub>3</sub>-N, T)、水文(V, H, Sed)和河床地貌(bank, Flow) 8 个纵向水文连通因子, 并将各因子划分为“VH、H、M、L、VL” 5 个适宜度等级; 采用四段式分析法分阶段建立模糊规则, 第一阶段以 V、H、T 计算初始适宜度 SI1, 第二阶段加入 DO、NH<sub>3</sub>-N 计算 SI2, 第三阶段融入 bank、Flow 计算 SI3, 第四阶段纳入 Sed 计算最终 SI, 过程中采用 CURrents 软件进行运算, 并利用 ArcGIS 整合空间数据; 同时结合鱼类不同生长阶段的需求差异(如鲤鱼产卵期 DO 适宜区间高于成鱼期)及春秋水文特征对规则进行调整, 最终形成的模糊规则可量化生境适宜程度, 为后续生境恢复潜力时空分析提供支撑。

不同物种及生命史阶段各评价因子的适宜度分级取值详见附录。

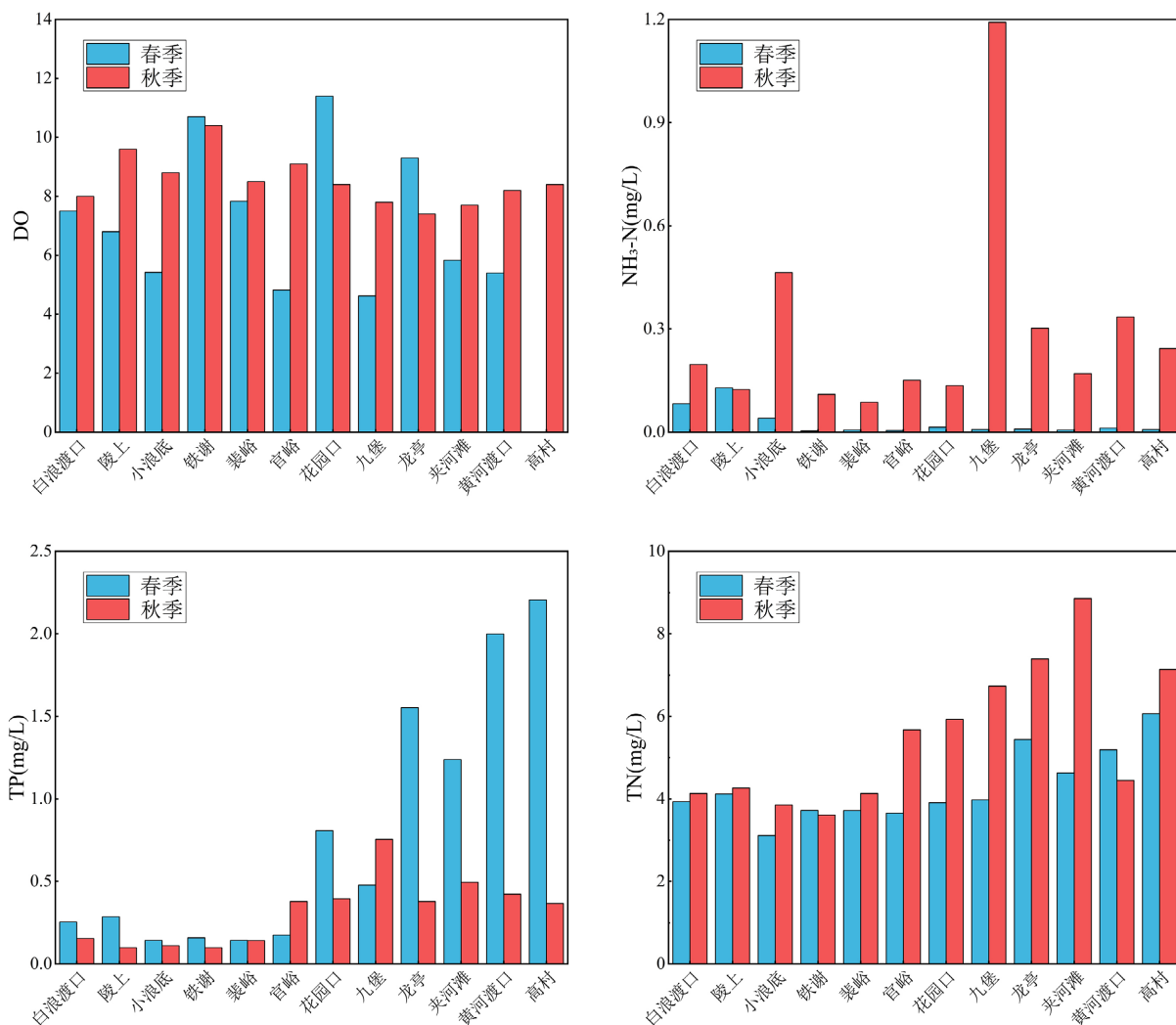
在模型运算中, CURrents 采用模块化设计, 通过输入目标鱼类对水深、流速、底质等生境条件的需求数据, 构建 0~1 范围的偏好函数(0 表示完全不适宜, 1 表示完全适宜), 并采用加权集成方法计算整体适宜度。同时, 模型支持基于专家知识的模糊偏好函数替代实测数据, 增强了模型的适应性。研究还结合气象、水文连通性等参数, 构建河流水生态响应标准, 通过权重分配与无量纲化处理, 解析黄河独特水沙条件与生态过程的耦合关系, 计算效率较传统方法提升了 3.7 倍, 为多目标优化决策提供了科学依据。最终输出生境恢复潜力指数, 直观反映黄河中下游鱼类栖息环境的修复潜力及关键限制因子。

## 3. 数据结果

春、秋两季各采样点主要水质指标变化见图 2。黄河中下游白浪渡口 - 高村河段春、秋两季采样监测结果显示, 该河段整体水质维持Ⅲ类及以上标准, 但部分指标存在明显的季节性和空间分异。干流采样点数据显示, 总氮(3.6~7.4 mg/L)和总磷(0.1~2.0 mg/L)浓度较高, 其中秋季总氮含量普遍高于春季, 而春季总磷含量在官峪下游明显偏高, 部分河段超过Ⅳ类标准。氨氮污染相对较轻, 秋季(Ⅱ类)略高于春季(Ⅰ类), 但九堡点受郑州城市排污影响, 氨氮浓度达 1.2 mg/L, 成为显著污染点。溶解氧(4.6~11.4 mg/L)整体状况较好, 季节差异不显著, 而高锰酸盐指数在九堡点春季达 6.8 mg/L, 反映出城市污染输入的影响。浊度(0.3~660 NTU)和含沙量(0.4~1.9 kg/m<sup>3</sup>)空间差异显著, 花园口下游因流速降低导致泥沙沉积增加, 加之秋季降水影响, 浊度及含沙量明显高于春季。磷酸盐浓度(0.006~0.04 mg/L)在官峪点下游秋季偏高, 电导率(春季平均 1094 μS/cm、秋季平均 702 μS/cm)则因离子浓度变化呈现季节性波动, 而水体 pH 稳定在弱碱性水平(约 8.0)。

水文动态方面, 河段流速较快(0.1~1.5 m/s), 秋季流速略高于春季, 且与水深(1~15 m)呈负相关。受黄土高原泥沙输入及小浪底水库调水调沙工程影响, 含沙量分布不均, 裴峪点下游因流速加快导致泥沙再悬浮。水温季节性差异显著, 春季平均水温为 13.7℃ (变幅 10.2℃), 秋季平均水温为 23.5℃ (变幅 5℃), 后者相对更为稳定。

河床地貌受长期泥沙淤积影响显著, 形成以细颗粒为主的漫滩地貌。人工丁坝体系虽稳定了岸线, 但局部河段仍因水资源分布不均导致河床与河道比例失调。九堡等邻近城市区域因排污叠加水文条件影响, 成为污染热点。综合分析表明, 该河段生态环境受自然水沙过程与人类活动双重调控, 需通过流域协同治理进一步优化水质条件和地貌稳定性。



**Figure 2.** Seasonal comparison of water quality parameters (TP, TN, DO, and NH<sub>3</sub>-N) at sampling sites in spring and autumn  
**图 2.** 春季和秋季各采样点水质参数(总磷、总氮、溶解氧和氨氮)的季节性对比分析

## 4. 讨论

### 黄河中下游河段鱼类生境恢复潜力

黄河中下游采样点鱼类生境恢复潜力的空间分布见图 3。黄河中下游鱼类生境恢复潜力的空间差异并不是由单一因子决定的,而是水文条件、水化学特征和河床地貌共同作用的结果。研究表明,小浪底坝下河段整体生境条件较好,3类指标鱼类 SI > 0.7 的河段占比均高于 78%;而夹河滩段黄河鲤鱼成鱼期和产卵期 SI > 0.7 的河段占比仅为 34%,且 J3 河段 SI 低于 0.5,说明该河段已成为黄河中下游纵向水文连通的薄弱区,对鱼类迁移和栖息具有明显限制作用。

从水文过程看,流速、水深和含沙量共同决定了鱼类对河段的利用程度。黄河中下游主河道流速整体较快,春季平均流速约为 0.6 m/s,秋季为 0.7 m/s,水深总体较大,平均约 5 m,局部最深可达 15 m,并呈现流速与水深相对反向变化的特征。与此同时,春季平均含沙量为 0.4 kg/m<sup>3</sup>,秋季为 0.5 kg/m<sup>3</sup>,且裴峪以下河段泥沙有再次升高趋势。这说明黄河中下游鱼类生境并不是“水量越大越好”,而是取决于流速、水深与泥沙条件之间是否形成适宜组合。黄河鲤鱼不同生长阶段栖息地适宜性指数的空间分布及

季节差异如图 4 所示。对于黄河鲤鱼而言, 成鱼期对一定流速和较深水体具有较强适应能力, 而产卵期更偏向流速较缓、水深较浅的河段; 刀鲚作为洄游性鱼类, 对纵向通道的连续性要求更高, 同时对高含沙环境更为敏感。刀鲚成鱼期栖息地适宜性指数的空间分布及季节变化见图 5。因此, 小浪底坝下河段之所以维持较高的生境恢复潜力, 关键在于其具有较连续的过流条件和相对较优的水沙组合; 而夹河滩段局部河段生境恢复潜力偏低, 则与河段碎片化、高流速和局地含沙条件不利密切相关。

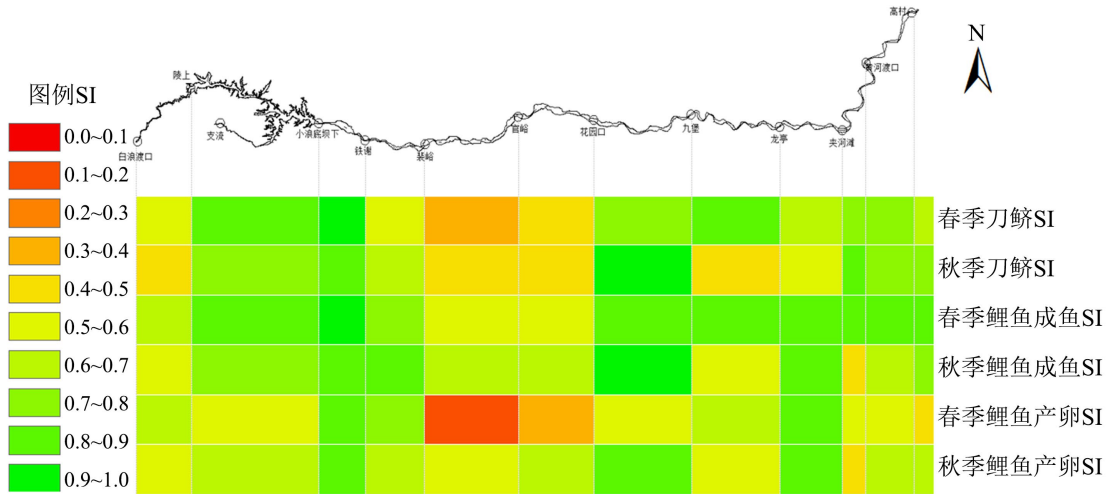


Figure 3. Spatial patterns of fish habitat restoration potential (SI) at sampling sites in the middle and lower reaches of the Yellow River

图 3. 黄河中下游采样点鱼类栖息地恢复潜力(SI)的空间分布模式

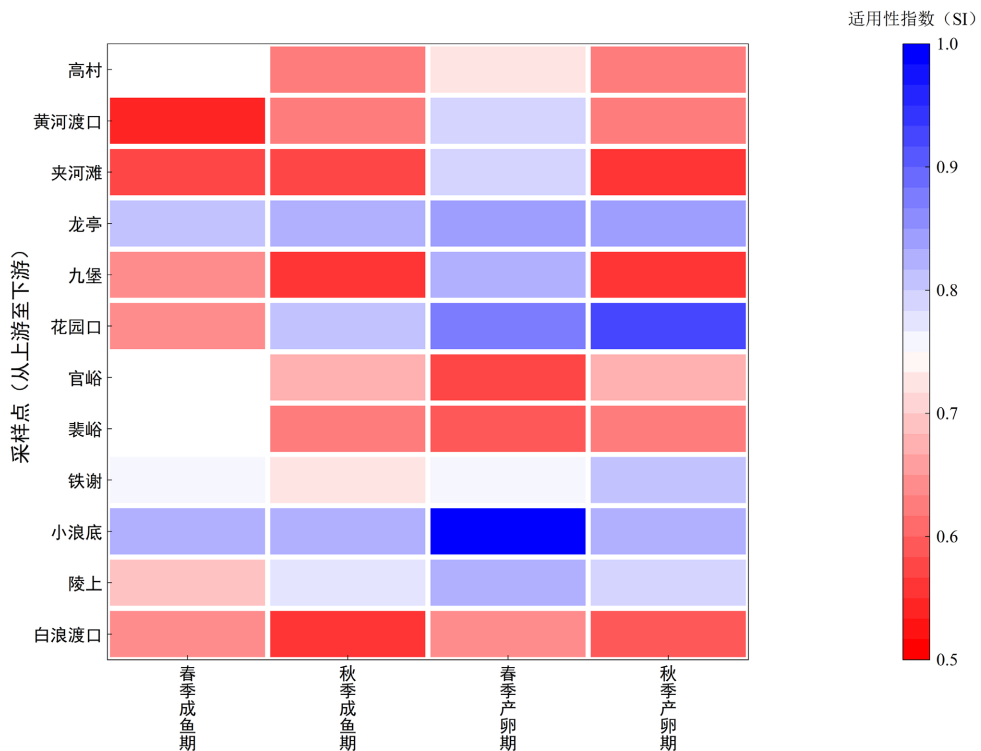
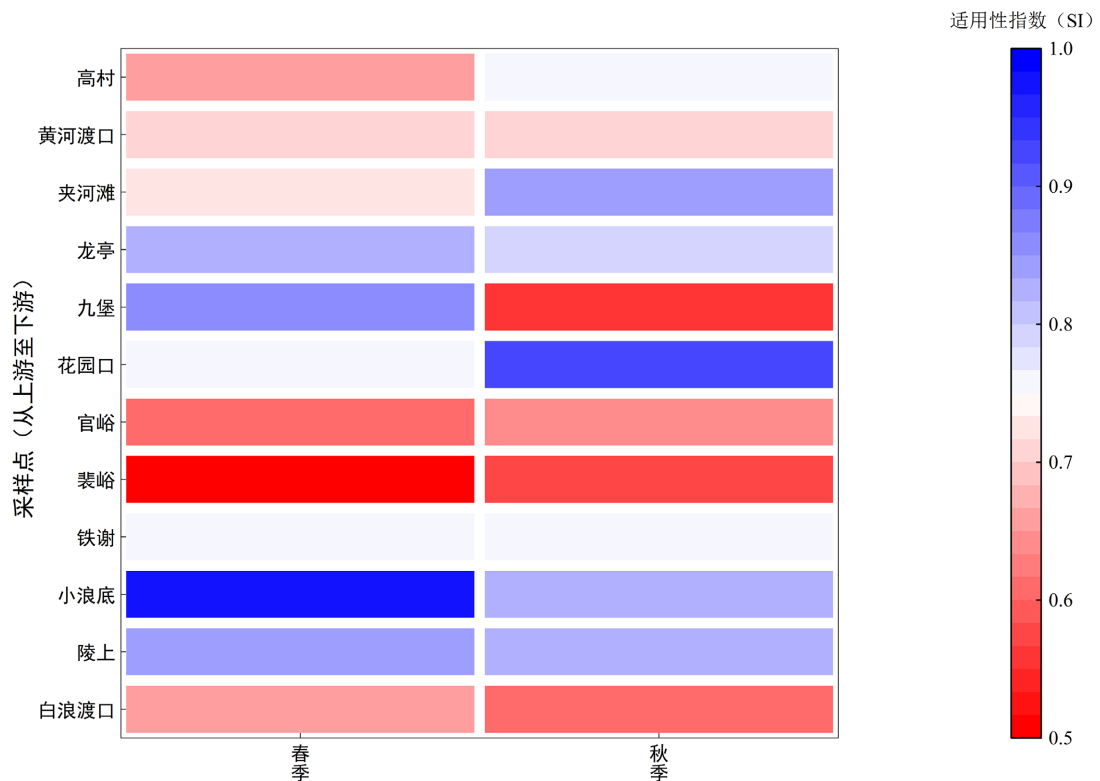


Figure 4. Seasonal and life-stage variation of habitat suitability index (SI) of carp at sampling sites

图 4. 采样点处鲤鱼栖息地适宜性指数(SI)的季节和生活阶段变化情况



**Figure 5.** Seasonal variation of habitat suitability index (SI) of *Coilia nasus* at sampling sites  
**图 5.** 采样点处刀鲚栖息地适宜性指数(SI)的季节变化情况

从水化学条件看, 研究区整体水质虽能够维持一定生态功能, 但局部河段仍存在明显污染压力。春秋两季监测结果表明, 总氮浓度为 3.6~7.4 mg/L, 总磷为 0.1~2.0 mg/L, 氨氮最大值出现在九堡点, 为 1.2 mg/L, 高锰酸盐指数在九堡点春季达到 6.8 mg/L, 反映出城市排污输入对局地河段的持续影响; 而溶解氧总体为 4.6~11.4 mg/L, 相对较为稳定。这些结果说明, 水质对鱼类生境的影响同样具有明显的河段差异。对黄河鲤鱼产卵期而言, 较高水温和较高溶解氧更有利于产卵和鱼卵孵化, 研究区春季平均水温为 13.7℃, 秋季为 23.5℃, 因此秋季整体更有利于产卵期生境形成; 而对刀鲚而言, 春季较低的含沙量和较低的氨氮水平更有利于降低洄游过程中的环境胁迫, 因此刀鲚成鱼期春季整体优于秋季。

从河床地貌看, 黄河中下游长期受泥沙淤积和人工整治共同影响, 形成了以细颗粒沉积为主的漫滩格局。河岸普遍修建丁坝和护岸工程, 虽然在防洪和岸线稳定方面发挥了作用, 但也削弱了近岸带与主槽之间的自然过渡, 降低了浅滩、缓流带和近岸隐蔽空间的多样性。对黄河鲤鱼而言, 岸带植被覆盖较高、护坡较自然的河段更有利于摄食、隐蔽和产卵; 对刀鲚而言, 河道连续性和较高的水流通达性则更为重要。夹河滩段生境恢复潜力偏低, 实际上正是高浊度、高总氮总磷、局部流速偏快和地貌破碎化叠加作用的结果。该河段秋季 TN 平均值为 7 mg/L、TP 平均值为 0.5 mg/L、CODMn 平均值为 6.3 mg/L, 浊度平均值高达 493.9 NTU, 明显高于小浪底坝下河段, 对鱼类生境形成了持续压制。

综合来看, 黄河中下游鱼类生境恢复潜力的形成机制可以概括为: 水文过程决定生境骨架, 水化学条件调节生境质量, 河床地貌控制生境空间连续性。小浪底坝下河段表现为相对优良的水沙组合与较好的纵向通道条件, 而夹河滩段则表现为污染输入、泥沙扰动和河段碎片化叠加下的受限区。畛河支流在模型中表现出较高的生境恢复潜力, 也表明低人为干扰、较高岸带植被覆盖和较好的水质条件更有利于维持鱼类生境质量。

基于上述结果, 黄河中下游鱼类生境修复应由单一水量调度转向“流量-含沙量-水质-岸带生境”协同调控。对于小浪底水库, 在春季刀鲰洄游期, 应尽量保持坝下下泄过程平稳, 避免短时间内流量剧烈波动, 同时控制高含沙水流集中下泄, 以维持连续、低干扰的洄游通道条件。对于夹河滩段, 应作为重点修复河段, 结合局部河势条件开展近岸缓流带恢复、岸带植被重建和生态护岸改造, 改善局部低 SI 河段对鱼类迁移的阻隔作用。同时, 还应加强九堡等受城市排污影响河段的污染控制, 降低氨氮和有机污染负荷, 避免水质恶化与不利水动力条件叠加后进一步加剧生境退化。黄河中下游鱼类生境恢复的关键不在于单独提高某一河段的适宜度, 而在于恢复沿河连续、稳定并具有季节适应性的复合生境格局。

## 参考文献

- [1] 王慷林. 生态文明与生物多样性的理论与实践[J]. 西南林业大学学报(社会科学), 2023, 7(1): 39-45.
- [2] 王光谦, 方红卫, 倪广恒, 等. 大江大河源区河网结构与径流特性研究前沿和重要基础科学问题[J]. 中国科学基金, 2016, 30(1): 27-33.
- [3] Vannote, R.L., Minshall, G.W., Cummins, K.W., Sedell, J.R. and Cushing, C.E. (1980) The River Continuum Concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **37**, 130-137. <https://doi.org/10.1139/f80-017>
- [4] 刘丹, 王烜, 李春晖, 等. 水文连通性对湖泊生态环境影响的研究进展[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(7): 1702-1715.
- [5] Men, B., Liu, H., Tian, W., Wu, Z. and Hui, J. (2019) The Impact of Reservoirs on Runoff under Climate Change: A Case of Nierji Reservoir in China. *Water*, **11**, Article 1005. <https://doi.org/10.3390/w11051005>
- [6] 王倩, 崔圆, 王晨, 等. 基于浮游生物群落和水文连通的黄河三角洲湿地优先恢复节点筛选[J]. 湿地科学, 2019, 17(3): 324-334.
- [7] 张仲胜, 于小娟, 宋晓林, 等. 水文连通对湿地生态系统关键过程及功能影响研究进展[J]. 湿地科学, 2019, 17(1): 1-8.
- [8] Karim, F., Dutta, D., Marvanek, S., et al. (2013) Hydrodynamic Modelling of Potential Impacts of Climate Change on Hydrological Connectivity of Floodplain Wetland. *Proceedings of the 20th International Congress on Modelling and Simulation*, Adelaide, 1-6 December 2013, 2332-2338.
- [9] Segurado, P., Branco, P. and Ferreira, M.T. (2013) Prioritizing Restoration of Structural Connectivity in Rivers: A Graph Based Approach. *Landscape Ecology*, **28**, 1231-1238. <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9883-z>
- [10] Chen, Y. and Wang, Y. (2019) Changes in River Connectivity Indexes in the Lower yellow River between 1960 and 2015. *River Research and Applications*, **35**, 1377-1386. <https://doi.org/10.1002/rra.3420>
- [11] 孟慧芳, 许有鹏, 徐光来, 等. 平原河网区河流连通性评价研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(5): 626-631.
- [12] 高常军, 高晓翠, 贾朋. 水文连通性研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(3): 586-594.
- [13] McDonough, O.T., Lang, M.W., Hosen, J.D. and Palmer, M.A. (2014) Surface Hydrologic Connectivity between Delmarva Bay Wetlands and Nearby Streams along a Gradient of Agricultural Alteration. *Wetlands*, **35**, 41-53. <https://doi.org/10.1007/s13157-014-0591-5>
- [14] 傅春, 李云翊, 王世涛. 城市化进程下南昌市城区水系格局与连通性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(7): 1042-1048.
- [15] Silva, D.d.S., Gonçalves, B., Rodrigues, C.C., Dias, F.C., Trigueiro, N.S.d.S., Moreira, I.S., et al. (2021) A Multibiomarker Approach in the Caged Neotropical Fish to Assess the Environment Health in a River of Central Brazilian Cerrado. *Science of The Total Environment*, **751**, Article 141632. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141632>
- [16] Liu, J., Zhang, X., Xu, Z., Wang, J., Ma, B., Xue, R., et al. (2021) Evaluation of the Impact of Urban River Bends on the Enhancement of Aquatic Habitats Using a Two-Dimensional Habitat Suitability Model. *Ecological Informatics*, **65**, Article 101428. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101428>
- [17] 余斌, 张建军, 刘一欧, 等. 小浪底水库调水调沙对黄河壶口至三门峡段浮游生物资源的影响[J]. 河北渔业, 2013, 229(1): 15-20.
- [18] Virtanen, L.K. and Sojinen, J. (2016) Temporal Variation in Community-Environment Relationships and Stream Classifications in Benthic Diatoms: Implications for Bioassessment. *Limnologia*, **58**, 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2016.01.003>
- [19] 陈凯, 于海燕, 张汲伟, 等. 基于底栖动物预测模型构建生物完整性指数评价河流健康[J]. 应用生态学报, 2017,

- 28(6): 1993-2002.
- [20] 朱卫红, 曹光兰, 李莹, 等. 图们江流域河流生态系统健康评价[J]. 生态学报, 2014, 34(14): 3969-3977.
- [21] 易雨君, 张尚弘. 水生生物栖息地模拟方法及模型综述[J]. 中国科学技术科学, 2019, 49(4): 363-377.
- [22] 石展耀, 张靖天, 霍守亮. EwE 模型在水生态系统中的应用研究及长潭水库案例分析[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(2): 567-577.
- [23] 夏继红, 陈永明, 周子晔, 等. 河流水系连通性机制及计算方法综述[J]. 水科学进展, 2017, 28(5): 780-787.
- [24] 贺亮亮, 张淑兰, 于澎涛, 等. 泾河流域的降水径流影响及其空间尺度效应[J]. 生态环境学报, 2017, 26(3): 415-421.
- [25] Meerkerk, A.L., van Wesemael, B. and Bellin, N. (2009) Application of Connectivity Theory to Model the Impact of Terrace Failure on Runoff in Semi-Arid Catchments. *Hydrological Processes*, **23**, 2792-2803.  
<https://doi.org/10.1002/hyp.7376>
- [26] 骆梦, 王青, 邱冬冬, 等. 黄河三角洲典型潮沟系统水文连通特征及其生态效应[J]. 北京师范大学学报, 2018, 54(1): 17-24.
- [27] 岑言霸, 苏斌, 冯泽波, 等. 滇池入湖河流 pH 时空分异特征及其变化机理[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(26): 11432-11442.

## 附录

物种/阶段	参数	高适宜(H)	中适宜(M)	低适宜(L)
鲤鱼成鱼期	流速 V (m/s)	0.1~0.8	<0.3	>0.8
	水深 H (m)	1~3	<1.5	>2.5
	温度 T (°C)	2~34	<16	>28
	氨氮 NH <sub>3</sub> -N (mg/L)	<0.5	0.02~2	>1.2
	溶解氧 DO	2~15	>9	<5.5
	河岸护坡 Bank	0.5~0.9	0.3~0.7	0.1~0.5
	水流流通 Flow	0.5~0.9	0.3~0.7	0.1~0.5
	含沙量 Sed (kg/m <sup>3</sup> )	<10	0~90	>60
鲤鱼产卵期	流速 V (m/s)	0~0.6	<0.1	>0.3
	水深 H (m)	0.8~2.5	<1	>1.4
	温度 T (°C)	18~34	<22	>28
	氨氮 NH <sub>3</sub> -N (mg/L)	<0.5	0.02~2	>1.2
	溶解氧 DO	4.5~15	>9	<5.5
	河岸护坡 Bank	0.5~0.9	0.3~0.7	0.1~0.5
	水流流通 Flow	0.5~0.9	0.3~0.7	0.1~0.5
	含沙量 Sed (kg/m <sup>3</sup> )	<10	0~90	>60
刀鲚成鱼期	流速 V (m/s)	0.05~1	<0.2	>0.5
	水深 H (m)	0~19	<1.5	>2.5
	温度 T (°C)	10~28	<15	>28
	氨氮 NH <sub>3</sub> -N (mg/L)	<0.4	0.02~3.1	>2.5
	溶解氧 DO	4~15	>8.24	<6.2
	河岸护坡 Bank	0.5~0.9	0.3~0.7	0.1~0.5
	水流流通 Flow	0.5~0.9	0.3~0.7	0.1~0.5
	含沙量 Sed (kg/m <sup>3</sup> )	<5	0~60	>20

注: Bank 和 Flow 为分级赋值因子; 其余因子为连续型变量。各参数阈值模糊隶属函数设定, 并结合鱼类生态习性、研究区实测数据及专家经验综合确定。