

# 团 体 标 准

T/CSES □□□-2026

## 河湖水生生物栖息地适宜性评价 技术指南

Technical guide for evaluation of aquatic habitat  
suitability in river and lake

(征求意见稿)

2026-?-? 发布

2026-?-01 实施

中国环境科学学会 发布

# 目录

前言	III
引言	IV
1 范围和目标	1
2 指南性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 基本原则	3
5 工作流程与评价步骤	4
6 河湖水生生物及其生境调查	4
6.1 生境调查	4
6.2 水生生物调查	5
6.3 生境因子对水生生物影响分析方法	5
6.4 拟评价水生生物确定	5
6.5 明确评价栖息地范围	6
6.6 明确拟评价栖息地生态需求	6
7 河湖水生生物栖息地适宜度评价指标体系筛选	7
7.1 水生生物栖息地适宜度评价指标	7
7.1.1 水生动物评价指标体系	7
7.1.2 水生植物评价指标体系	8
7.2 栖息地适宜性评价指标的筛选方法	9
8 河湖水生生物栖息地适宜性评价方法	9
8.3 适宜度曲线法	9
8.4 模糊逻辑法	12
8.5 水生生物栖息地适宜性等级	15
8.6 整体栖息地适宜性评价-加权可适宜面积	16
8.7 其他评价技术和方法	16
8.7.1 基于多元统计的评价方法	16
8.7.2 综合评价法	17
8.8 栖息地适宜度指数地图	17
9 评价报告编制	17

9.1 工作准备 .....	17
9.2 调查监测 .....	17
9.3 报告编制 .....	17
9.3.1 评价报告内容 .....	17
9.3.2 报告专题图 .....	18
参考文献 .....	19
附录 A 河流水生生物栖息地信息调查记录表 .....	20
附录 B 栖息地适宜性评价指标的含义 .....	21
附录 C 应用案例 .....	23
C.1 基于偏好曲线法的某鱼类栖息地适宜性评价。 .....	23
C.2 基于模糊规则法进行某鱼类栖息地适宜性评价 .....	24

## 前言

本文件按照 GB/T 1.1-2020 《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本指南的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国环境科学学会提出并归口。

本文件主编单位：

本文件参编单位：

本文件主要起草人：

本文件主要审查人员：

## 引言

河湖水生生物栖息地作为水生生态系统的关键组成部分，为水生生物提供了繁殖与生存的环境，并且承担着水体物质循环与能量流动的重要功能。为了更有效地指导各地区开展河湖水生生物栖息地适宜性评价，推进河湖水生生物栖息地的保护工作，以及促进河长制、湖长制的实施与水生态健康考核，依据中共中央办公厅、国务院办公厅颁布的《关于全面推行河长制的意见》和《关于在湖泊推行湖长制的指导意见》等相关政策法规，制定河湖水生生物栖息地适宜性评价技术指南显得尤为必要。该指南旨在进一步发展和完善水生生物栖息地适宜性评价体系，以期更高效地应用于河湖水生态系统的保护与修复实践。

# 河湖水生生物栖息地适宜性评价技术指南

## 1 范围和目标

本指南规定了河湖水生生物栖息地适宜性评价的术语和定义、评价对象、评价指标、评价方法等内容。

本指南适用于河流（不包括入海河口）、湖泊及水库〔简称河湖〕的水生生物栖息地适宜性评价。

本指南主要用于开展栖息地适宜性评价，保护河湖水生生物，识别生态敏感区和退化区域，为河流、湖泊等水生态系统的健康评价、生态修复和生态调度提供支撑。

## 2 指南性引用文件

下列文件中的内容通过文中的指南性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本指南。

《水生态健康评价技术指南》GB/T43476-2023

《地表水环境质量标准》GB3838-2025

《江河生态安全评估技术指南》GB/T43474-2023

《水生态监测技术指南 河流水生生物监测与评价（试行）》HJ1295-2023

《水生态监测技术指南 湖泊和水库水生生物监测与评价（试行）》HJ1296-2023

《河流水生生物栖息地保护技术指南》NB/T 10485-2021

《河湖健康评价规范》SL/T 793-2025

《生物多样性观测技术导则 爬行动物》HJ 710.5-2014

《生物多样性观测技术导则 两栖动物》HJ 710.6-2014

《生物多样性观测技术导则 内陆水域鱼类》HJ 710.7-2014

《生物多样性观测技术导则 淡水底栖大型无脊椎动物》HJ710.8-2014

《淡水生物水质基准推导技术指南》HJ 831-2022

《河湖水生生物保护物种确定技术指南》T/CSES 158-2024

《流域水生态完整性评价技术规范》T/ACEF 120-2023

《河湖水生生物完整性评价技术指南》T/CSES 171-2024

《河流生态调查技术规范》 T/CSES 57-2022

《河流和湖库水生态环境质量监测与评价技术规范》 DB11/T 2320-2024

《水文调查规范》 SL196-2015

《地表水资源质量评价技术规程》 SL 395-2007

### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本指南。

#### 3.1

河湖水生生物 aquatic organism

泛指栖息于河流、湖泊、池塘、水库等淡水生态系统的生物类群，涵盖浮游生物、游泳生物、底栖生物、水生植物等类型，包含鱼类、两栖动物（如蛙类）、哺乳动物（如江豚）、水鸟、昆虫、浮游动植物、沉水或挺水水生植物等多个类群。

#### 3.2

指示物种 indicator species

对环境中某些干扰，包括环境条件的改变或污染物作用等较为敏感并能够快速产生明显反应的生物，其特性包括物种数量、出现或缺失、种群密度、传播和繁殖等，可用来表征所关注的特定指标或环境条件。用于河湖栖息地评价的指示物种主要包括鱼类、浮游植物、大型底栖无脊椎动物、大型水生植物、藻类和水鸟等。

#### 3.3

水生生物栖息地 habitat

栖息地，亦称生境，一般指某种生物或某一生态群体生存与繁衍的区域或环境类型，涵盖水生生物完成整个生活史过程所必需的水域范围，例如鱼类的产卵场、索饵场、越冬场以及连接不同生活史阶段的水域洄游通道等；水生植物生长与繁殖的适宜水域或水位等。

#### 3.4

栖息地（生境）因子 habitat (biotope) factors

对物种或种群分布具有显著影响的环境条件与资源条件的各类要素。就水生生物而言，涵盖水文情势、栖息地物理结构、水环境质量、饵料（营养）来源等方面的具体物理、化学及生态参数等。

#### 3.5

栖息地适宜性评价 evaluation of habitat suitability

以生物栖息地环境为基础，分析研究生物分布区域内各种环境因子的状态，筛选影响生物个体生存和种群繁衍的关键环境因子，结合野外调查与模型分析，定量或定性评价某一区域环境条件对特定生物生存、栖息、繁殖和活动的适宜程度，明确研究范围内适宜生物生存、分布的空间。

### 3.6

#### 适宜度曲线 habitat suitability curves

以栖息地因子的数值为横坐标，目标物种对此栖息地因子的适宜度为纵坐标建立目标物种对单个栖息地因子的偏好与栖息地因子之间关系的连续曲线。用 0 到 1 的数值定义目标物种对单因子的偏好，曲线的峰值代表生物对该因子的最适宜或最偏好范围。

### 3.7

#### 栖息地适宜度指数 habitat suitability index

适宜度指数 (Suitability index, SI) 被认为是栖息地适宜性的表征指数。用来度量生物对栖息地偏好与栖息地因子之间的综合关系。栖息地适宜度指数是一个介于 0 到 1 之间的值，代表目标物种对某种环境因素（如水深、水速、植被、基质、水温等）的偏好，由适宜度曲线得出，当适宜度指数值接近 1 时，栖息地适宜程度更好。

### 3.8

#### 栖息地适宜性等级划分 habitat suitability gradation

对栖息地适宜度指数进行划分，一般分为 5 级：高度适宜、较适宜、一般适宜、较不适宜、极不适宜。

## 4 基本原则

### 4.1 科学性原则

4.1.1 应客观、可靠地描述河湖水生生物栖息地状况；

4.1.2 评价指标设置应合理，能清晰地指示生物-环境的响应关系，准确揭示栖息地适宜性状况；

4.1.3 生境和水生生物调查应采用统一、标准化方法。

4.1.4 评价方法、程序需正确，数据来源需客观、真实，反映真实栖息地适宜性状况。

4.2 实用性原则 评价指标体系需符合我国的国情、水情、生物状况与河湖管理实际，选择效率高、符合实际条件的调查方法。

4.3 可操作性原则 评价所需基础数据需根据人力、资金等条件，在经济可行性、现有技术可达性基础上，选择易获取、可监测的方法获得的数据参数。

## 5 工作流程与评价步骤

5.1 河湖水生生物栖息地适宜性评价的工作流程涵盖技术准备、生境与生物调查、栖息地评价及报告编制等环节。

5.2 首先应通过数据收集、文献调研或专项调查，全面掌握待评价河流与湖泊的水生生物及其生境现状。依据本指南确定的河湖水生生物栖息地适宜性指标，制定评价指标的调查监测方案与技术大纲，实施水生生物栖息地生境调查、生物多样性调查及生态机理分析，筛选评价指标与方法体系，最终完成栖息地适宜性评价。

5.3 工作流程如图 1 所示。

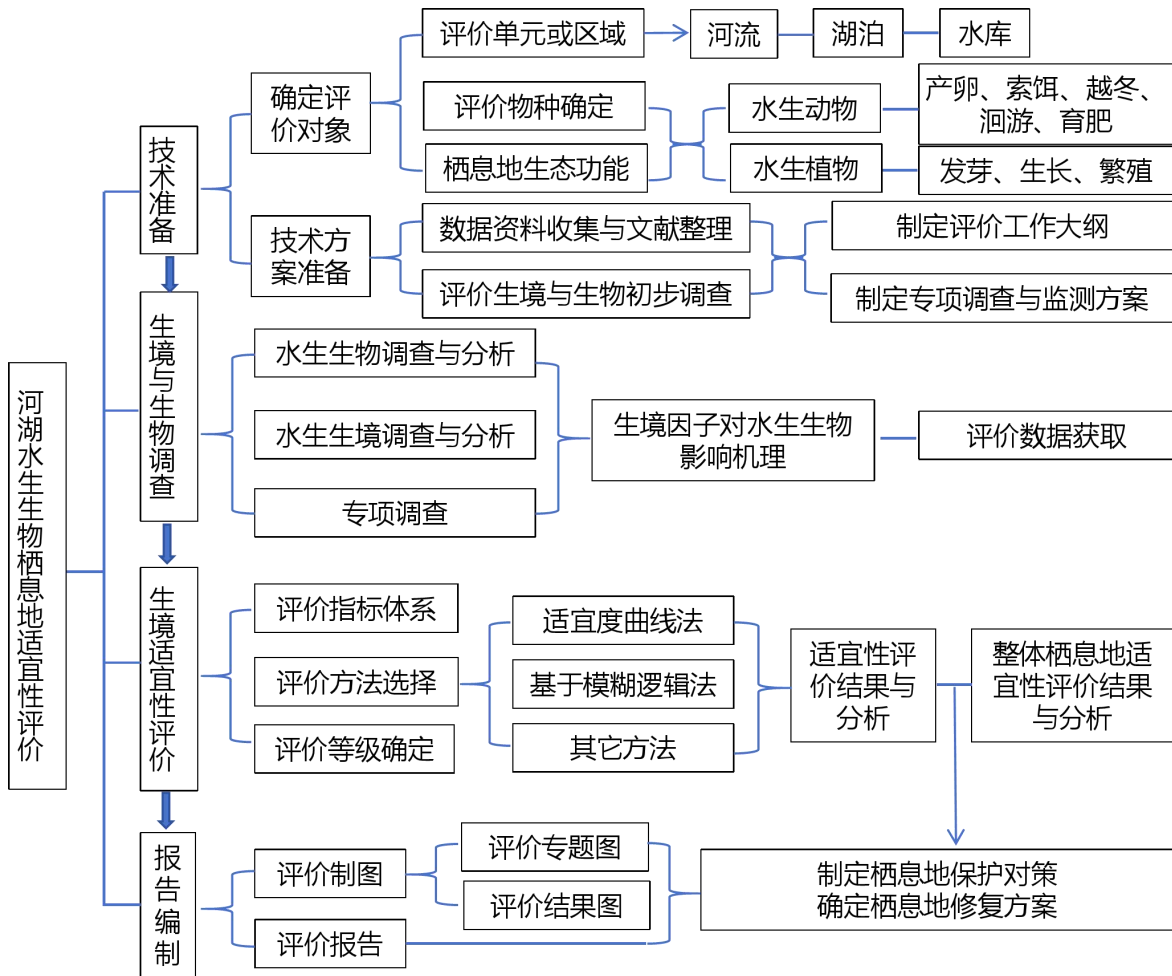


图 1 河湖水生生物栖息地适宜性评价流程图

## 6 河湖水生生物及其生境调查

### 6.1 生境调查

6.1.1 调查涉及河道状况、河（湖）岸形态、河（湖）床底质、水体流动类型、植被以及相邻陆地的使用情况等。

**6.1.2** 数据来源于野外调查、遥感反演、问卷调查和模型模拟等。其中，地形、水文、水质及水生态数据可通过现场监测、调查问卷填写和水环境模拟模型（如 MIKE,EFDC 等）获取。

**6.1.3** 数据调查方法、采集频率、精度要求及质量控制等应参考《水文调查规范》SL196-2015、《地表水资源质量评价技术规程》SL 395-2007、《河湖健康评价规范》SL/T 793-2025、《河流生态调查技术规范》T/CSES 57-2022、《河流和湖库水生态环境质量监测与评价技术规范》DB11/T 2320-2024 等相关技术规范。

## **6.2 水生生物调查**

**6.2.1** 河湖水生生物栖息地适宜性评价应在初步筛选出河流（湖）或河（湖）段后开展水生生物栖息地调查。

**6.2.2** 具体调查内容和调查方法应按现行行业标准或规范，例如《水生态监测技术指南 河流水生生物监测与评价（试行）》HJ1295-2023、《水生态监测技术指南 湖泊和水库水生生物监测与评价（试行）》HJ1296-2023 和《水电工程水生生态调查与评价技术指南》NB/T 10079 等有关国家、行业技术规范和标准规定执行。

**6.2.3** 通过调查明确评价河流、湖泊水生态状况、主要生物群落和珍稀物种、乡土物种和保护物种等情况。调查记录表参考附录 A。

## **6.3 生境因子对水生生物影响分析方法**

**6.3.1** 数据处理通常采用两种主要方式：一是针对各类属性进行可视化呈现，生成特定属性的分布图；二是通过聚类分析或统计分析揭示属性与参数间的关联。

**6.3.2** 在研究非生物因子与栖息地适宜性关系时，单变量分析法和多变量分析法应用广泛。

**6.3.3** 由于物理生境通常涉及水深、流速、底质、覆盖物等多个变量，多变量分析法更适用于解析水生栖息地与物种多样性的联系。其中，普通多元线性回归法和逻辑回归法是模拟物种与环境变量间关系的常用多变量分析方法。

## **6.4 拟评价水生生物确定**

**6.4.1** 用于栖息地适宜性评价的指示物种主要包括大型水生植物、浮游植物、大型底栖无脊椎动物、鱼类和水鸟类等，具体可以参照《河湖水生生物保护物种确定技术指南》T/CSES 158-2024 进行确定。

**6.4.2** 应当挑选那些对栖息地变化反应最为灵敏的典型物种，这些物种的变化能够直观反映栖息地中其他生物群体的变化情况；或者在经济价值或物种资源（如乡土种类）方面具有重要意义的物种，或者是特定保护目标中的特殊物种。可以通过生物

调查或渔业资源调查来识别这些物种。

**6.4.3** 通常，在开展河湖水生生物栖息地适宜性评价前，需明确具体的评价生物对象。鱼类作为水生生态系统的顶级群落，占据食物链顶端，对其他种群的存续和丰度影响显著，且对环境变化敏感，因此成为栖息地适宜度评价中最常选用的指示物种。

**6.4.4** 实践中多以鱼类为主要评价对象，例如黄河流域的黄河鲤；或选择关键生物类群（如鱼类、底栖动物及水生植物）进行综合评价。以鱼类为例，通过研究区域内不同类型水域的鱼类种类组成、地理分布状况、数量、群体结构状态及对其产生影响的生物、非生物因素、筛选出具体指示物种。

## **6.5 明确评价栖息地范围**

**6.5.1** 栖息地范围可选择特定河段（湖域）或整条河流（整个湖泊），也可针对特殊生境类型进行选择，如边滩、心滩、河心岛、洲、浅滩、急流、跌水、开阔型缓流、溪流型缓流、深潭、湖岸带或湖心洲等。

**6.5.2** 依据相关技术规范，需调查待评价栖息地的范围、面积、水文特征、水环境特征、生态群落结构及食物网特征，以及地形地貌、泥沙、水动力条件等。

**6.5.3** 评价时可将河流划分为若干河段分别评价，再通过长度或面积加权整合为整条河流的评价结果。

**6.5.4** 对于湖泊，可将整个湖体作为评价单元，或划分为多个子单元进行评价，最终通过面积或容积加权获得全湖综合评价结果。

## **6.6 明确拟评价栖息地生态需求**

**6.6.1** 在评价特定栖息地对目标物种的生态价值时，需依据其核心生态需求进行区分。

**6.6.2** 对于水生动物，如鱼类，应重点考察其作为产卵场、索饵场、越冬场以及连接不同生命史过程的水域洄游通道的功能；对其他水生生物也按照不同生长时期对栖息地的需求进行分期评价；

**6.6.3** 对于水生植物，则需分别评估其在萌芽、生长和繁殖等关键生命环节中所起的作用。

**6.6.4** 拟评价的栖息地生态需求见表 1。

表 1 拟评价河湖水生生物的栖息地生态需求

水生动物		水生植物
鱼、虾、贝等	其他水生生物	发芽、生长、繁殖等
产卵场、索饵场、越冬场、洄游（连通）通道等	繁殖、觅食、生长等	

## 7 河湖水生生物栖息地适宜度评价指标体系筛选

评价指标体系选择应该考虑评价生物特征、评价水体差异和评价栖息地的生态功能差异。应以本指南规定的指标体系进行综合评价。指标层包括基本指标、备选指标

### 7.1 水生生物栖息地适宜度评价指标

#### 7.1.1 水生动物评价指标体系

**7.1.1.1** 根据水生动物栖息地的生态功能差异（如产卵场、索饵场、越冬场及洄游通道），需分别建立相应的评价指标体系。

**7.1.1.2** 不同生长阶段的水生动物对栖息地因子的需求存在差异，例如产卵期、幼鱼期和成鱼期各有侧重。

**7.1.1.3** 在构建指标体系时，应结合评价对象的具体特性选取适宜指标。

**7.1.1.4** 本指南提供的候选指标库，可针对不同生物种类及生长阶段的需求，综合运用文献频次分析法、专家打分法和主成分分析法筛选核心评价指标。

#### 7.1.1.5 不同类型水体水生动物栖息地适宜度候选指标库

##### (1) 河流水生动物栖息地适宜性评价指标

表 2 河流水生动物栖息地适宜度候选指标库

目标层	准则层	指标层	优选指标
河流水生生物栖息地适宜性	水文水动力条件	水位水深，流量，脉冲流量，流速，水面宽度，洪水频率，洪水大小，干旱程度，干旱频率；无量纲参数：弗劳德数、雷诺数	流量，流速，水深，脉冲流量等
	物理结构	底质，泥沙，河岸稳定性，覆盖物（光照条件），河道蜿蜒，河岸带植被，河流连通性，岸带连通性等	底质，河岸蜿蜒，连通性，覆盖物等
	水环境状况	水温，营养物质，浊度，盐度，溶解氧，pH，有毒物质等	水温，营养物质，溶解氧等
	饵料条件	藻类量，碎屑饵料，能量输入（泥沙、营养物等），颗	碎屑饵料，藻类

		粒有机物，水生无脊椎动物，陆生无脊椎动物，其他食物等。	量等
	人类干扰程度	水上交通影响；河道整治、清淤等涉水工程施工	水上交通影响程度等

## (2) 湖库水生动物栖息地适宜性评价指标体系

表 3 湖库水生动物栖息地适宜性候选指标库

目标层	指标	具体指标	优选指标
湖泊水生生物栖息地适宜性	水文情势	水位水深，流量，脉冲流量，流速，水面宽度，洪水频率、洪水大小、干旱程度、干旱频率；无量纲参数：弗劳德数、雷诺数、涡量等	水位水深，流速，流量，脉冲流量等
	物理结构	多样性，底质，湖岸稳定性，覆盖物（光照条件），湖库岸蜿蜒，湖库岸带植被，连通性等	底质，湖岸稳定性，覆盖物等
	水环境状况	水温，营养物质，浊度，盐度，溶解氧，pH，有毒物质等	水温，营养物质，溶解氧等
	食物来源	藻类量，浮游动物，能量输入（泥沙、营养物等），颗粒有机物，水生无脊椎动物，陆生无脊椎动物等	藻类量，泥沙有机质等
	人类干扰程度	水利工程影响，水上交通影响，清淤工程施工等	水上交通影响程度

### 7.1.2 水生植物评价指标体系

对于河湖中特定的水生植物，主要评价特定水生植物的生存环境的适宜性，见表 4。

表 4 河湖水生植物栖息地适宜性候选指标库

目标层	指标	具体指标	优选指标
河湖水生植物栖息地适宜性	水文情势	流量，流量变化，流速，水面宽度，水位水深，洪水频率、洪水大小、干旱程度、干旱频率；无量纲参数：弗劳德数、雷诺数、涡量等	水位水深，流量变化，洪水频率等
	物理结构	多样性，底质，河岸稳定性，覆盖物（光照条件），河湖蜿蜒，连通性等	底质，河岸稳定性，连通性，光照条件等
	水环境状况	水温，营养物质，浊度，盐度，溶解氧，pH，有毒物质等	水温，营养物质等
	生物气候变量	年均温、平均日较差、等温性、最热月最高温、最冷月最低温、年气温变化范围等	年均温，年气温变化范围等
	人类干扰程度	水利工程建设影响，水上交通影响等	水利工程建设影响等

7.1.3 各指标详细含义参见附录 B。

## 7.2 栖息地适宜性评价指标的筛选方法

7.2.1 指标筛选应遵循初步建立候选指标库、基于文献频次分析和专家经验等进行初筛、利用主成分分析等统计方法降维、最终确定核心指标集的流程。

7.2.2 在实际应用中，可根据数据可获性综合运用多种方法。

### 7.2.3 主要方法

7.2.3.1 文献分析法和专家判断法 通过对相关资料的分析和专家经验判断，总结不同指标对物种的影响机理，以及物种对指标的敏感性大小，得出指示物种对目标物种的核心评价指标。

7.2.3.2 现场调查或实验方法 通过现场调查获取物种/生态系统的实际分布、资源利用与环境响应数据，再通过实验验证指标的因果关系与敏感性，最终筛选出对栖息地质量变化敏感、能真实反映适宜性的核心指标。

7.2.3.3 主成分分析法 主成分分析是适用于多重共线性数据的另一种多变量统计方法。通过主成分的特征值 ( $>1$ ) 和累积贡献值 ( $>70\%$ ) 挑选出最主要的主成分。

$$(R - \lambda I)p = 0 \quad (\text{式 1})$$

式中：I 为 m 阶单位矩阵。解该方程能得出一系列特征值； $\lambda_j$  ( $j=1:m$ )，以及一系列特征值  $p_j$  ( $j=1:m$ )；主成分或得分  $f_j$  ( $j=1:m$ ) 是原始变量的线性组合，对每个变量的权重由特征向量给出。

## 8 河湖水生生物栖息地适宜性评价方法

8.1 栖息地因子的适宜性取决于物种出现频率和分布状况。

8.2 目前已有多种栖息地适宜度评价方法用于量化栖息地质量与生物选择之间的关系，例如适宜度曲线法和模糊逻辑法。前者计算简单但未考虑栖息地变量间的相互作用与相关性，后者能处理变量间的相互关系并考虑不准确、不确定的数据，但是参数较多时模糊逻辑规则数量会迅速增加。

### 8.3 适宜度曲线法

8.3.1 水生生物栖息地适宜度指数(HSI)是用来定量描述水生生物对栖息地的偏好程度与栖息地因子之间关系的方法，由美国鱼类及野生动物署在栖息地评价程序(Habitat

evaluation procedures, HEP)中率先提出。

**8.3.2** 栖息地适宜度曲线是物理栖息地特征与物种在该条件下生存质量的定量描述。适宜度曲线以栖息地因子的数值为横坐标，以目标物种对此栖息地因子的偏好程度(即适宜度, SI)为纵坐标，建立目标物种对单个栖息地因子的偏好与栖息地因子之间关系的连续曲线。用 0 和 1 之间的数值定义目标物种对单因子的偏好，曲线的峰值代表生物对该因子的最适宜或最喜爱的范围。

**8.3.3** 栖息地适宜度曲线有三种格式：二元格式(binary format)，单变量格式(univariate format)，多变量格式(multi-variate format)，曲线形式见图 2。

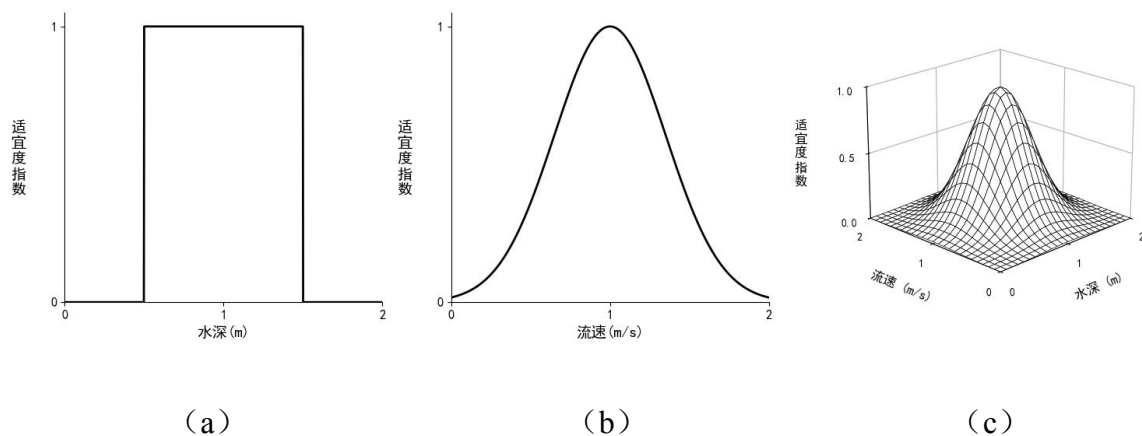


图 2 三种典型的适宜度曲线

(a)二元格式；(b)单变量格式；(c)多变量格式

**8.3.3.1** 单变量二元格式 对每一个因子的适宜范围以阶梯函数表示(图 2a)，假如一个因子的值位于适宜范围之内，其适宜度为 1，反之为 0。这表明无论其他因子的值为多少，一旦一个因子适宜度为 0，则计算单元是不适宜的，一个计算单元只有所有的因子均在适宜范围内才能是适宜的栖息地。

**8.3.3.2** 单变量曲线格式 单变量格式是通过连续曲线或阶梯函数定义栖息地因子对某种生物的适宜范围(图 2b)。一般用 0-1 的数值进行定义。曲线的峰值代表生物对该因子的偏好范围，曲线的两个端点代表该因子的适宜范围。

**8.3.3.3** 多变量格式 由于物种选择栖息地是选择一个适宜的栖息地因子组合，因此需要计算每个研究单元的组合适宜度(图 2c)。

**8.3.3.4** 组合适宜度可以用算术平均法、几何平均法、乘积法、最小值法、加权求和(积)法等将各个因子的适宜度组合起来得到。

a) 算术平均法：考虑每个变量相互独立，且重要性相同，较好的变量可以适度补偿其他变量条件的不足。

$$HSI = \frac{\sum_{i=1}^n SI_i}{n} \quad (\text{式 2})$$

b) 几何平均法：考虑变量之间补偿作用。

$$HSI = \prod_{i=1}^n SI_i \quad (\text{式 3})$$

c) 最小法：取决于限制性因子，不考虑因子之间的相互作用。

$$HSI = \min(SI_1, SI_2, \dots, SI_n) \quad (\text{式 4})$$

d) 加权求和法：考虑实际情况给每个因子赋予权重，表明因子之间重要性差异。

$$HSI = \sum_{i=1}^n SI_i W_i \quad (\text{式 5})$$

e) 加权求积法：加权乘积考虑不同因子之间的补偿作用。

$$HSI = \prod_{i=1}^n (SI_i)^{W_i} \quad (\text{式 6})$$

f) 多元函数法

$$HSI = \frac{1}{N} e^{-\left(a_1 d + a_2 v + a_3 d^2 + a_4 v^2 + a_5 d v\right)} \quad (\text{式 7})$$

式中： $HSI$  为适宜度指数； $SI_i$  为物种对  $i$  因子的适宜度，由适宜度曲线得出； $W_i$  为  $i$  因子的权重，取值范围 0~1； $d$  为水深； $v$  为流速； $a_i$  系数； $n$  为因子个数， $N$  为标准化参数。

**8.3.4.5** 各个因子的权重可由专家判断确定，也可通过层次分析法、主成分分析、熵权法等统计方法确定。考虑到不同生命阶段（如产卵期、幼鱼期、越冬期）的差异，针对不同生命阶段分别构建适宜度曲线或设置不同权重。

### 8.3.5 适宜度曲线的确定方法

确定栖息地适宜性曲线的方法有三种：

**8.3.5.1** 专家判断法 由专家根据文献或经验确定每个因子对生物的适宜程度；优点：不需要野外实测数据，省时省力；缺点：依据专家主观或经验判断，缺少一定的可靠性。

**8.3.5.2** 生境利用法 以实测的微观生境特征频率分布为基础，直接由目标物种特定的生命阶段的栖息地使用情况确定。在实验中，观测每个样点的栖息地因子属性数据，基于数据建立相应的使用频率分布直方图，纵坐标的频率为相应区间内观察到的数

据，根据测量数据得到频率分布很少能直接得到的光滑曲线。该方法基于实测数据有一定的可靠性，但是在没有最佳栖息地的条件下，物种只能选择最低质量的栖息地，而经常选择的栖息地并不一定是最佳栖息地。

**8.3.5.3 生境偏好法** 基于观察频率，但同时考虑某一有限生境类型的可获取性。每个生态位通过它们在观测系统中出现的百分比进行加权或相乘。频率分析和生境生态位加权同时进行。可以使用生境偏好度（适宜性）进行描述。

生境偏好度计算公式为：

$$SI_i = \frac{U_i}{A_i} \quad (\text{式 } 8)$$

式中： $i$ 为某生境因子的第 $i$ 个区间； $SI_i$ 为目标物种对某生境因子 $i$ 区间的相对偏好值（适宜性）； $U_i$ 为某生境因子第 $i$ 因子的使用百分比，等于区间内观察到的鱼的数量除以鱼的总数量； $A_i$ 为研究河段采样时期某生境因子第 $i$ 区间的可获得百分比。经过标准化后得到最大值为1的适宜度指数，最后使用回归方法模拟该影响因子适宜度曲线。

## 8.4 模糊逻辑法

**8.4.1 定义输入的栖息地环境变量与特定物种在特定生命阶段的栖息地适宜度之间的关系。**模糊规则分为条件部分和结果部分，条件部分描述物种栖息地的环境条件，结果部分对物种对该环境条件的偏好程度进行描述。这样可以更好的处理不精确、不确定的测量结果和模糊的专家知识。

**8.4.2 模糊逻辑法的计算流程如下：**

1) 根据研究区域研究对象对各环境变量的偏好情况，建立各环境变量的模糊集和模糊规则；

2) 根据模糊规则条件部分各变量模糊集的隶属度函数，计算各输入变量对相应模糊集的隶属度；

3) 如果条件部分用“且”连接，基于第(2)步计算得到的一组隶属度，采用最小值法或乘积法计算该组输入变量对于此条模糊规则的匹配度(DOF, degree of fulfillment, 表示各条规则对于该组输入环境变量栖息地适宜度的影响程度)，同理计算出该组输入环境变量对于每条模糊规则条件部分的匹配度；

4) 采用乘积法或最小值法将匹配度与模糊规则的结果部分(即栖息地适宜度的模糊集)合并，得到该组环境变量对全部模糊规则的总匹配度函数；

5) 去模糊化，将上一步得到的总匹配度函数图形的形心或重心的值作为栖息地适宜度的值，该值在0~1的范围内。

8.4.3 模糊逻辑法能很好地解决栖息地模拟中信息的不确定性问题，它可以利用非精确或者模糊的信息，也可以将专家知识用偏好数据集表示。

#### 8.4.4 具体步骤

8.4.4.1 建立模糊集和模糊规则 根据文献和专家经验，结合实测数据校正，定义模糊集和模糊规则（表 5）。模糊逻辑基于不精确信息或数值，利用隶属函数表达“部分真实”。

表 5 模糊规则集

规则	流速	水深	底质	覆盖物	适宜度
1	高	高	粗糙	0	低
2	中	中	粗糙	0	中
3	高	低	粗糙	0	低
4	高	高	粗糙	1	中
5	高	中	粗糙	1	中
6	高	低	粗糙	1	低
...	...	...	...	...	...

8.4.4.2 输入隶属函数并计算隶属度 隶属度函数 $\mu(x)$ 是模糊逻辑方法中的基本组成部分，用隶属函数 $\mu_A(x)$ 定义一套模糊集 A， $\mu_A(x)$ 给出参数 x 对模糊集 A 的隶属度 $\mu$ 。x 对 A 的隶属度 $\mu$ ，隶属函数 $\mu_A(x)$ 描述的规则集可能是某个范围内的恒定或与其他规则集相重叠的区域，且隶属度之和不一定为 1，或者某个参数可以隶属于不止一个的规则集。以流速为例，图 3。

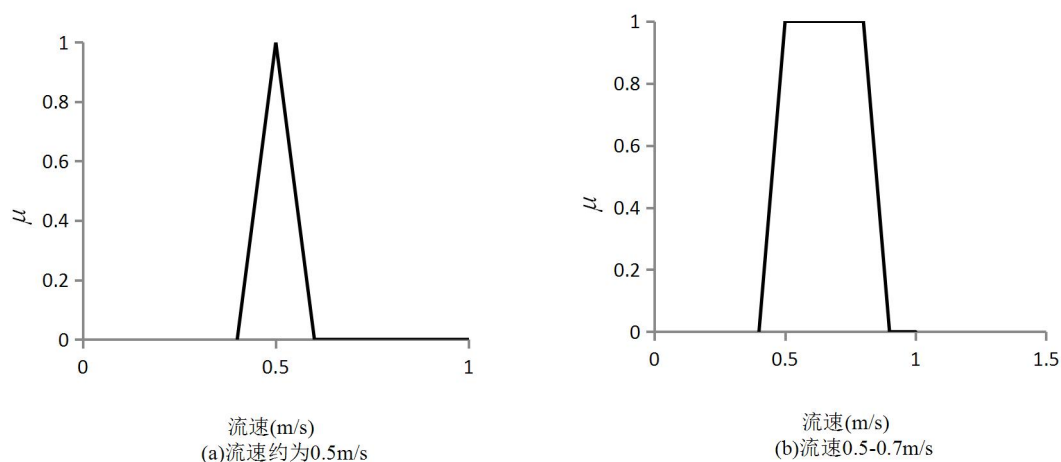


图 3 两种流速下的隶属函数曲线

**8.4.4.3 定义规则结论** 如表 5 中，规则 1 为，如果流速为高、水深为高、底质粗糙、覆盖物为 0，则栖息地适宜度低。以此类推，确定其他规则。例如流速  $x=0.3\text{m/s}$ ，在模糊集 A “低流速” 的隶属度  $\mu_A(x)=0.5$ ，对模糊集 B “中流速” 隶属度也为 0.5，见图 4。

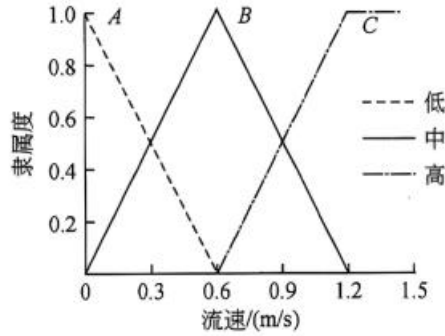


图 4 变量 A(低流速)、B (中流速) 和 C(高流速)隶属函数曲线

**8.4.4.4 计算匹配度 DOF(degree of fulfillment)** 对整个规则集运行推理规则，并检查每条规则是否存在一定的匹配度  $v$ 。规则集中依据不同规则推导出的隶属度水平可能不同，即  $\mu_A(x_1) \neq \mu_B(x_2) \neq \mu_C(x_3)$ 。而对每个规则都需要一个匹配度，计算匹配度推理方法如下：

1)最大-最小值推断法

$$\begin{aligned} v(A \text{ 且 } B) &= \min(\mu_A(x_1), \mu_B(x_2)) \\ v(A \text{ 或 } B) &= \max(\mu_A(x_1), \mu_B(x_2)) \end{aligned} \quad (\text{式 } 9)$$

式中： $v(\cdot)$ ，规则的匹配度； $\mu_A(x)$ ，对模糊集 A 规则的隶属函数

2)乘积推断法

$$v(A \text{ 且 } B) = \mu_A(x_1) \times \mu_B(x_2) \quad (\text{式 } 10)$$

$$v(A \text{ 或 } B) = \mu_A(x_1) + \mu_B(x_2) - \mu_A(x_1) \times \mu_B(x_2) \quad (\text{式 } 11)$$

**8.4.4.5 结论的组合方法** 河流系统中的每种情况或每个单元，通常通过不同规则得到的隶属度不同，可采用最大峰值组合计算综合隶属度。即找出所有规则对应的最大 DOF，从低到高的栖息地适宜度结论的隶属函数在 DOF 最大处截断，得到最大峰值组合得到的总结论  $\mu_{tot}$

$$\mu_{tot} = \max(\min(v_i, \mu_{k_i}(x))) \quad (\text{式 } 12)$$

$$\mu_{tot}(x) = \max_{i=1, \dots, n} (\min(v_i, \mu_{K_i}(x))) \quad (\text{式 } 13)$$

式中：i，规则的序号； $K_i$ ，规则 i 的结论； $\mu_{K_i}(x)$ ，规则 i 结论的隶属函数； $v_i$ ，规则 i 的匹配度。见图 5。

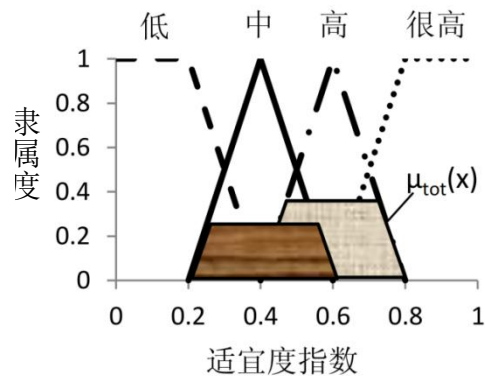


图 5 基于最大峰值组合的总的结论

当然也可以使用最大值组合、加权总和组合和赋权加权组合等方法。

**8.4.4.6 去模糊化** 确定单元栖息地质量的最后一步是得到定义栖息地质量的一组 0 到 1 的数字。函数  $\mu_{tot}(x)$  和下面包围区域定义了一个单元的总栖息地适宜度，有多种方法可以计算模糊集和隶属函数的脆弱度，通过某种类型的平均值  $M(K)$  或  $M(K_{tot})$  代表模糊函数  $\mu_{tot}(x)$ ，这个过程称为去模糊化。比如采用最大值平均法，公式如下：

$$M(K_{tot}) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot \mu_{K_{tot}}(x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} \mu_{K_{tot}}(x) dx} \quad (\text{式 14})$$

式中： $M(K_{tot})$ ，即单元适宜度指数（CSI, cell suitability index），是  $\mu_{K_{tot}}(x)$  最大值的中点对应的横轴坐标，见图 6。

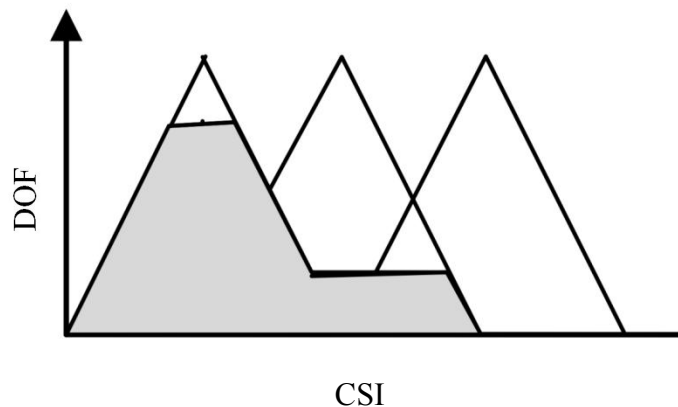


图 6 基于最大值平均的去模糊化和适宜度指数计算

**8.4.4.7** 两种方法应用案例参考件附录 C。

## 8.5 水生生物栖息地适宜性等级

水生生物栖息地适宜性等级划分一般分为 5 级，见表 6。

表 6 河湖水生生物栖息地适宜性等级划分

适宜性等 级	含义	适宜度指数
高度适宜	评价区域生境条件的适宜性高，生态系统健康，生物栖息地质量优、数量多。	$0.8 < HSI \leq 1$
较适宜	评价区域生境条件的适宜性较高，生态系统一定程度退化，但生物栖息地数量较多。	$0.6 < HSI \leq 0.8$
一般适宜	评价区域生境条件的适宜性一般，生态系统一定程度退化，生物栖息地数量适中。	$0.4 < HSI \leq 0.6$
较不适宜	评价区域生境条件的适宜性较差，生态系统较大程度退化，生物栖息地数量较少	$0.2 < HSI \leq 0.4$
极不适宜	评价区域生境条件的适宜性差，生态系统严重退化，生物栖息地数量极少或消失。	$0 < HSI \leq 0.2$

## 8.6 整体栖息地适宜性评价-加权可适宜面积

假设每个评价单元中可获得栖息地的面积加权总和能够表示在特定流量下的总的栖息地质量。对某评价对象，可以划分多个栖息地进行栖息地适宜性评价，对评价结果再进行综合评价，确定河流或湖泊总体栖息地适宜度。

$$WUA = \sum_{i=1}^n A_i \cdot C_i = f(Q) \quad (\text{式 15})$$

式中： $A_i$ ，单元  $i$  的面积； $C_i$ ，单元  $i$  的适宜度指数  $CSI$ ； $WUA$ ，栖息地面积和质量的综合指标，随河流（湖泊）大小和宽度而变化，其值必须小于淹没面积，单位为  $m^2/1000m$ 。

$WUA$  的标准表达方式是每 1000m 河段长度内栖息地面积，即河段平均河宽中适合作为栖息地的部分。

## 8.7 其他评价技术和方法

在河湖水生生物栖息地适宜性评价中，除了上面推荐方法外，实际工作中还有其他一些方法，如多元统计方法、综合评价法、模型模拟法、人工智能法等。可以结合具体工作选用。

### 8.7.1 基于多元统计的评价方法

多元统计方法考虑物理变量之间的相互作用，通过多个环境特征的累积效果来决定物种的响应。主要方法有：

1) 多元线性回归方法：运用多元线性回归方法建立物种响应与栖息地因子变量之间的相互关系，利用最小二乘法求解物种响应与栖息地变量之间的回归系数。

2) 主成分分析法：通过非生物变量的数据找到主成分，然后用筛选的主成分对响应变量进行回归，预测方程使用最小二乘法得出，将响应变量表示为所选的主成分的函数。

3) 逻辑回归。通过逻辑回归分析一个伯努利型或二元响应变量和许多解释变量（因子）之间的关系，允许同时分析分类变量和连续变量。

**8.7.2 综合评价法** 构建综合评价指标体系，确定权重和分级标准，采取综合评价技术进行综合评价，如模糊栖息地综合评判法。

## **8.8 栖息地适宜度指数地图**

评价单元适宜度指数的计算结果在面域上的集合即为栖息地适宜性地图，不同的曲线代表不同栖息地适宜度，以 0-1 表示。从地图可以知道不同适宜度的空间分布，以及不同水流条件下，栖息地适宜度的变化。

## **9 评价报告编制**

### **9.1 工作准备**

依据本指南 7 的评价指标，结合栖息地评价区域，提出调查监测方案，明确技术内容，形成水生生物栖息地适宜性评价工作大纲。

### **9.2 调查监测**

依据本指南 6 的样品采集和监测指南，开展调查监测。

### **9.3 报告编制**

系统整理分析监测数据，根据本技术指南 8 计算栖息地适宜度指数，评价河湖水生生物栖息地状况，编制河湖水生生物栖息地适宜性评价报告。

#### **9.3.1 评价报告内容**

**9.3.1.1 河湖基本情况。**概要说明河湖所在流域内的自然地理、水系及历史演变、水文气象及经济社会状况，概要分析水资源及开发利用状况、水环境、水生态等方面的主要特点及存在的主要问题。

**9.3.1.2 栖息地适宜性评价体系构建。**说明目标栖息地适宜性评价体系的基本构建过程；说明评价体系构建的时间、调查勘测方案；说明评价体系构建过程中参照点及其确定依据、候选指标库、核心指标筛选过程、指标权重计算方法、评价标准划分方法等；说明依据本指南确定的目标栖息地评价体系的核心指标、指标权重和评价标准。

**9.3.1.3 栖息地适宜性评价方案。**说明目标河湖水生生物栖息地适宜性评价的评价时间和范围；说明各评价河段、湖段的空间位置与物理参数（如河流包括起始与终止断面的经纬度、河长、河宽等）、地形地貌、水文水资源、河湖物理形态、水环境及水生态的分区特点；说明各评价河段栖息地适宜度指数和加权面积的分区特点。

**9.3.1.4 栖息地适宜性评价调查监测。**说明调查与监测方案，详细说明各评价指标数据来源；以图表结合方式，说明监测方案的监测点位、监测河段、监测断面和取样点的布置方案，并说明监测点位（河湖段、断面）的代表性；说明监测频次和监测时间；说明监测采用的设备和方法；以图表方式，展示监测指标的监测成果；分析各评价指标数据的代表性、准确性、可靠性与客观性。

**9.3.1.5 适宜性评价过程与结果。**按照本指南目标河湖构建形成的评价方法与标准，选择合适的评价方法，给出适宜性评价结论。

**9.3.1.6 栖息地适宜性问题分析与保护对策。**根据各指标及综合赋分情况，说明栖息地整体特征、不适宜的主要表征，识别的关键限制性因子；开展定期评价的河湖，结合前期评价结果，说明变化趋势；开展生物-环境压力指标响应关系解析，分析栖息地破坏的主要压力，给出持续改进意见，给出栖息地保护及修复目标建议方案（表7）。

表 7 生态环境适宜性评价对策表

适宜性等级	保护措施
高度适宜	设立保护区，禁止开发
较适宜	限制干扰活动，生态补水
一般适宜	实施河道修复工程
较不适宜/不适宜	优先开展生境重建

### 9.3.2 报告专题图

**9.3.2.1 河流、湖泊水系图，**同时包括水资源分区、水功能区区划、行政区划、重要水利工程布置等信息。

9.3.2.2 栖息地适宜度监测方案图，包括评价河段及监测点位的位置图，监测断面及采样点分布图等。

### 参考文献

1. 易雨君, 张尚弘.水生生物栖息地模拟.科学出版社, 北京, 2019
2. 石瑞花, 许士国.河流生物栖息地调查及评估方法.应用生态学报, 2008,19(9):2081-2086
3. 易雨君, 张尚弘.水生生物栖息地模拟方法及模型综述.中国科学 技术科学, 2019, 49(4): 363-377.
4. 易雨君, 程曦, 周静. 栖息地适宜度评价方法研究进展.生态环境学报, 2013, 22(5): 887-893
5. 康鑫, 张远, 张楠, 等.太子河洛氏鳢幼鱼栖息地适宜度评估.生态毒理学报, 2011, 6(3): 310-320
6. Armour C L, Taylor J G. Evaluation of the instream flow incremental methodology by U.S. fish and wildlife service field users. Fisheries, 1991, 16: 36-43
7. 班璇.中华鲟产卵栖息地的生态需水量.水利学报, 2011, 42(1): 47-56
8. 英晓明, 崔树彬, 刘俊勇, 梁志宏.水生生物栖息地适宜性指标的模糊综合评判.人民珠江, 2007,5:29-32
9. 赵越, 周建中, 常剑波, 张勇传.模糊逻辑在物理栖息模拟中的应用.水科学进展,2013,24(3):427-435

附录

附录 A 河流水生生物栖息地信息调查记录表

附表 1 河流水生生物栖息地信息调查记录表

河流名称:	地点:	
采集日期:	时间:	
调查人:	批次编号:	
站位#	河段长度:	水深:
经纬度:	河道:	
流速:	水温:	
遮蔽物:	深潭浅滩类型:	
pH:	水质参数:	
河岸带:	水生生物:	
...	...	
...	...	
栖息地底质类型	<input type="checkbox"/> 75%以上是碎石、鹅卵石、大石，其余为细沙等沉积物 <input type="checkbox"/> 50%-75%以上是碎石、鹅卵石、大石，其余为细沙等沉积物 <input type="checkbox"/> 25%-50%以上是碎石、鹅卵石、大石，其余为细沙等沉积物 <input type="checkbox"/> 碎石、鹅卵石、大石少于 25%，其余为细沙等沉积物	
样品采集	采样设备: 采样方式: 采样方法:	
备注		

## 附录 B 栖息地适宜性评价指标的含义

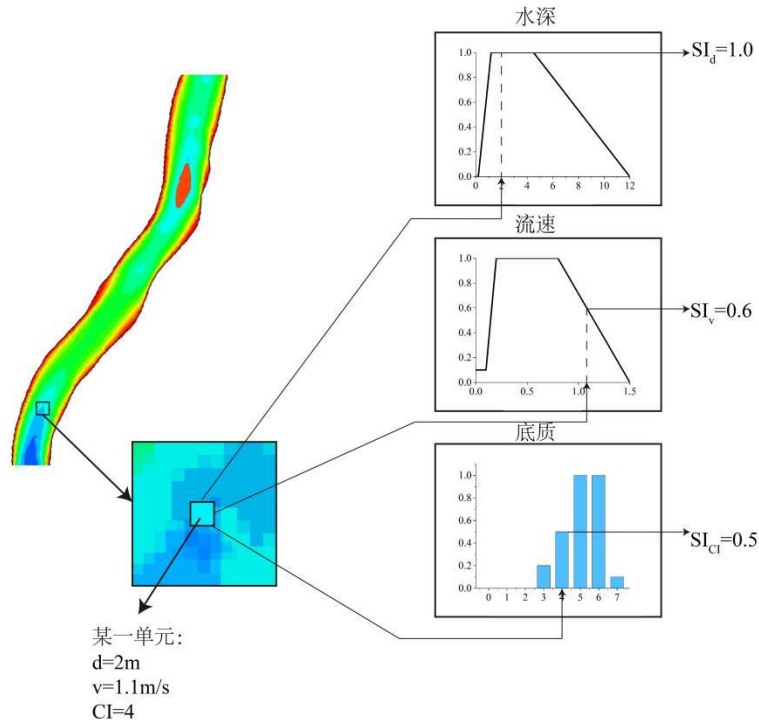
类别	指标	指标含义
水文情势	水位水深	水体的垂直深度/水位变化
	流量	水流的水量大小
	流量变化（脉冲流量）	流量的变化大小和频率
	流速	水体流动的快慢程度
	水面宽度	河流、湖泊的水面宽度/面积
	洪水频率	某一量级的洪水在长时期内平均多少年出现一次
	洪水大小	某次洪水或某一频率设计洪水的量级规模
	干旱程度	河川径流显著偏少、水位偏低程度；或者湖库水位偏低程度
	干旱频率	某一量级的干旱在长时期内平均多少年出现一次
	弗劳德数	表征了惯性力与重力间的量级之比，是一个表征流速高低的无量纲量。
	雷诺数	雷诺数是流体惯性力与黏性力比值的量度，它是一个无量纲数
	涡量	一个描写旋涡运动常用的物理量。流体速度的旋度 $\text{rot } V$ 为流场的涡量。
	...	...
物理结构	生境多样性	生境类型的多寡
	底质	水体底部的物质组成，如泥沙、岩石等
	河岸稳定性	河岸带基底的稳定程度
	覆盖物（光照条件/水体透明度）	栖息地周围植被的种类和密度，为生物提供藏身和繁殖场所的物体 水体中光线穿透的程度，反映水质的清澈度
	河道蜿蜒度	河道弯曲变化程度
	河岸带植被	河岸带植被覆盖与连通程度
	水文连通性	水流廊道的连通程度
	...	...
水环境状况	水温	河流或湖泊中水体的温度

	营养物质 (N、P)	水体中氨氮、磷等营养物指标
	浊度	水体中浑浊程度
	盐度	水体中盐分
	溶解氧	水体中溶解氧
	pH	水体酸碱度
	有毒物质/重金属	水体重金属或有毒物质
	...	...
食物来源	藻类量	可供生物食用的藻类物质丰富程度
	能量输入 (泥沙、营养物等)	可供生物食用的能量满足程度
	颗粒有机物	可以食用的有机物/树木等植物残体
	浮游动物/植物	食物网中供食用的浮游动物/植物
	水生无脊椎动物	食物网中供食用的水生无脊椎动物
	陆生无脊椎动物	食物网中供食用的陆生无脊椎动物
	...	...
人类干扰	水利工程影响程度	人为工程设施影响、调水和流量管控
	水上交通密集程度	运输或旅游等船只密集程度
	污水排放影响	排污影响栖息地情况
	...	...
生物气候变量	年降水	栖息地天然补水情况
	年气温	栖息地气温适宜性
	年气温变化范围	栖息地气温变化适宜性
	...	...

## 附录 C 应用案例

### C.1 基于偏好曲线法的某鱼类栖息地适宜性评价。

对某水生生物,对某栖息地单元多个栖息地因子进行适宜度评价。水深为 0.32m,流速 0.80m/s,底质指数 CI=5。偏好曲线如附图 1:



附图 1 隶属函数及适宜度计算

(1) 根据偏好曲线计算,  $SI_1=SI_d=1.0; SI_2=SI_v=0.6; SI_3=SI_{CI}=0.5$   
式中,  $j=1$  为水深,  $j=2$  为流速,  $j=3$  为底质。

(2) 根据表 4 分级标准, 综合评价:

- 1) 采用乘积法  $HSI=SI_d \times SI_v \times SI_{CI}=0.3$  (不适宜)
- 2) 采用几何平均值计算:  $HSI=\sqrt[3]{SI_d \times SI_v \times SI_{CI}}=0.67$  (一般适宜)
- 3) 采用算术平均值计算:  $HSI=(SI_d + SI_v + SI_{CI})/3=0.10$  (较适宜)
- 4) 采样最小值计算, 则  $HSI=0.5$  (较不适宜)

## C.2 基于模糊规则法进行某鱼类栖息地适宜性评价

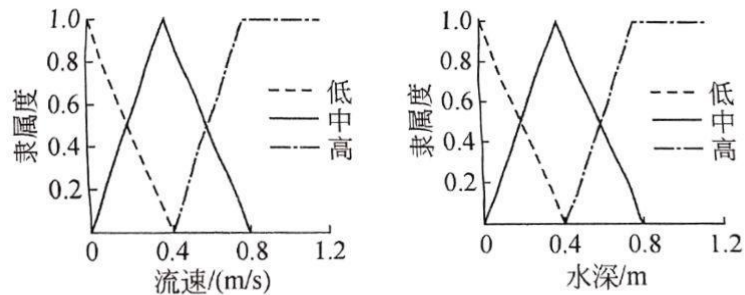
1) 首先建立模糊规则集

附表 1 模糊规则集

规则	流速	水深	适宜度
1	高	高	低
2	中	中	中
3	高	低	低
4	低	中	中
5	高	中	中
6	中	低	低
...	...	...	...

2) 建立栖息地因子隶属函数

基于野外观察及统计资料，建立水深、流速隶属函数（附图 2）。



附图 2 流速和水深的隶属函数

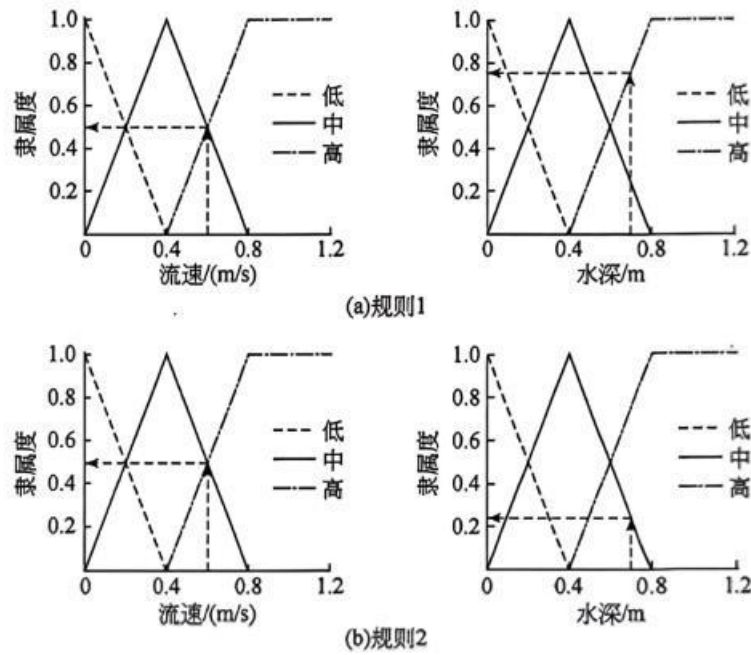
3) 定义规则的结论

以规则 1 和规则 2 为例定义，对于某单元， $x_1=0.6\text{m/s}$ ， $x_2=0.7\text{m}$

由上述附表 1 规则， $\mu_A(0.6) = 0.5 \neq \mu_B(0.7) = 0.75$ ，其中 A 是高流速，B 是高水深

规则 2 得到， $\mu_A(0.6) = 0.5 \neq \mu_B(0.7) = 0.25$ ，其中 A 是中流速，B 是中水深

由规则 1 和 2 的隶属函数如下（附图 3）：



附图3 规则1和2的隶属函数

4) 对于研究单元使用推理规则，计算匹配度  $DOF(\text{degree of fulfillment})$

对同一规则使用两个自变量（或变量），分别是水深和流速，规则见附表1中规则1和规则2。

对规则1  $\mu_A(x_1)=0.5$  且  $\mu_B(x_2)=0.75$ ，那么使用最小值-最大值推理法计算  $DOF$ ：  
 $\nu R1 = \min(\mu_A(x_1), \mu_B(x_2)) = \min(0.5, 0.75) = 0.5$

使用乘积推理法计算  $DOF$ ： $\nu R1 = \mu_A(x_1) \cdot \mu_B(x_2) = 0.5 \cdot 0.75 = 0.375$  因此栖息地适宜性为“低”。

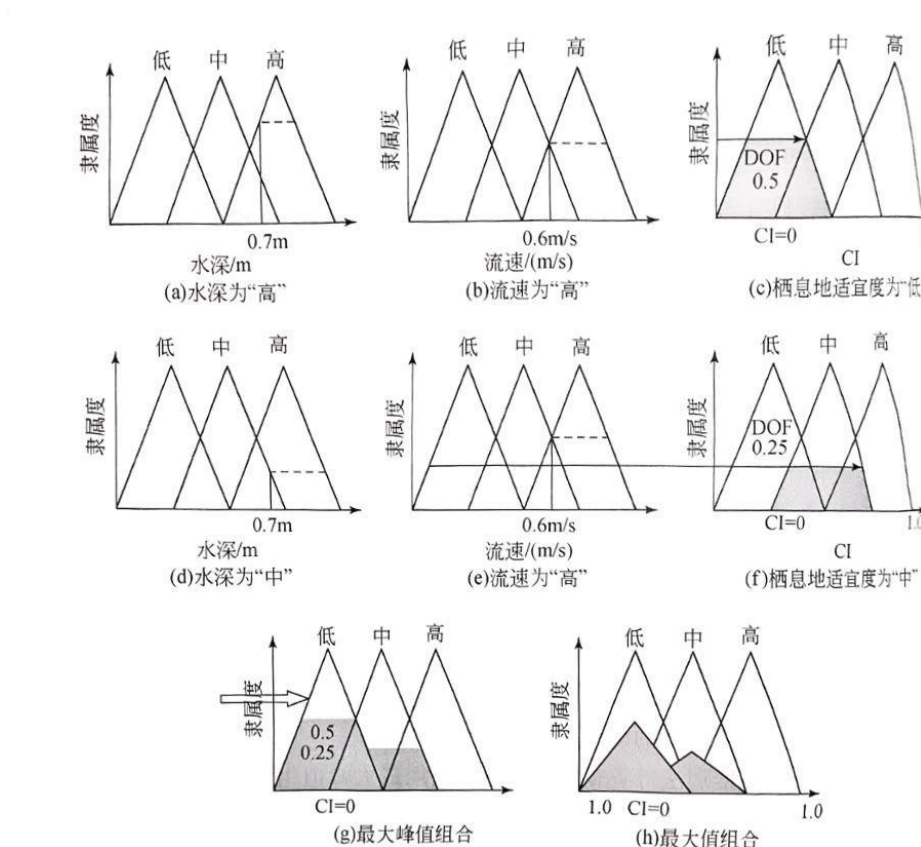
同样对规则2，按照上面计算， $\nu R1 = 0.25$ （最小值-最大值法）， $0.125$ （乘积法），栖息地适宜性为“中”。

5) 综合规则1和规则2的结论

对最小值-最大值推理得到的  $DOF$ ，运用最大峰值组合和最大值组合对规则1和规则2的结论进行组合，结果见附图4。

6) 去模糊化

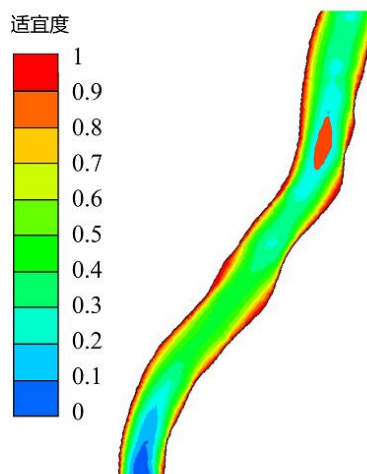
用最大值平均法去模糊化。运用最大值平均得到的评价单元栖息地适宜度指数为  $HSI=0.5$ 。



附图 4 评价单元栖息地适宜度指数

### 7) 栖息地评价作图

单元适宜度指数计算结果在面上的集合为栖息地地图，可以暂时不同适宜度栖息地的空间分布。



附图 5 栖息地适宜度指数空间分布图