

文章编号: 1674 - 5566(2011)02 - 0260 - 10

## 栖息地适宜性指数在渔业科学中的应用进展

龚彩霞<sup>1</sup>, 陈新军<sup>1,2,3</sup>, 高峰<sup>1,2,3</sup>, 官文江<sup>1,2,3</sup>, 雷林<sup>1,2,3</sup>

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 大洋生物资源开发和利用上海市重点实验室, 上海 201306; 3. 上海海洋大学 大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室, 上海 201306)

**摘要:** 栖息地适宜性指数(habitat suitability index, HSI)于20世纪80年代提出之后,在渔业资源开发、管理、评估及保护等领域中得到广泛应用,已成为渔业科学研究的重要手段之一。简要概述了国内外HSI研究现状、理论和方法,以及应用现状和存在问题。并概括提出HSI研究和应用过程中,要充分考虑的问题有:(1)充分了解研究对象生活史过程及其生物学特性和所处的环境;(2)针对不同生长阶段和外部环境,选择合适的环境因子;(3)开展数据源合适时空标准的研究,建立环境因子等数据的规范;(4)根据历史资料和专家知识赋予各因子的合适权重;(5)针对不同目标(保护区、中心渔场、生物量估算等),来选择备选的HSI模型;(6)通过各种模型的分析,选择合适的HSI模型;(7)利用实测数据和最新资料,对模型进行不断改进与修正,以提高模型的精度。

**研究亮点:** 简要概述了HSI研究现状和存在问题,提出了其应用中应考虑的问题,即充分了解研究对象生活史过程;不同生长阶段应选择合适的环境因子;建立数据源的时空标准及其权重;不同目标下的HSI模型以及模型的不断改进与修正。

**关键词:** 栖息地适宜性指数; 模型开发; 渔业科学

**中图分类号:** S 931.4

**文献标识码:** A

外部环境是所有动物生存的首要条件,每一种动物都有它所需要的特定的栖息地(也称生境,habitat)。一旦动物所赖以生存的栖息地缩小或消失,动物的数量也随之减少或灭绝,保护和管理好一个栖息地的重要前提是正确分析和评估栖息地的优劣<sup>[1]</sup>。而栖息地适宜性指数(habitat suitability index, HSI)是一种评价野生生物生境适宜度程度的指数。

HSI模型最早由美国地理调查局国家湿地研究中心鱼类与野生生物署于20世纪80年代初提出,被用来描述野生动物的栖息地质量<sup>[2]</sup>。该署还对157种野生鸟类和鱼类建立了HSI模型。目前,HSI模型已被广泛用于物种管理、环境影响评价、丰度分布和生态恢复研究<sup>[3-5]</sup>。

近年来,HSI模型也被应用于鱼类分布、中心渔场预报等方面<sup>[6-17]</sup>。基于生态系统的渔业资

源管理是当前渔业科学发展趋势,掌握鱼类在不同生长阶段独特的HSI是重要的研究内容之一,HSI研究也已成为渔业科学中研究的热点。为此,本文在分析栖息地指数理论和方法的基础上,归纳HSI在渔业科学中的应用进展,借以推进HSI建模与应用在我国渔业科学的研究水平。

### 1 HSI的理论和方法

#### 1.1 概念

一般而言,栖息地是生物的个体或种群居住的场所,又称生境,是指生物出现在环境中的空间范围与环境条件总和<sup>[18]</sup>,包括个体或群体生物生存所需要的非生物环境和其他生物。20世纪中期以前,美国生态学家克列门茨和谢尔福德认为,所谓生境,是仅包括与生物或生物群落相应的物理和化学因素的场所。国际研究委员会

收稿日期: 2010-07-20 修回日期: 2010-10-25

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2007AA092201;2007AA092202);教育部博士点基金(20093104110002);国家发改委专项(2060403)和上海市捕捞学重点学科项目(S30702)

作者简介: 龚彩霞(1986-),女,硕士研究生,专业方向为渔业栖息地理论。E-mail: gongcai111@163.com

通讯作者: 陈新军, Tel: 021-61900306, E-mail: xjchen@shou.edu.cn

(national research council, NRC)认为,栖息地是指动物或植物通常所居住、生长或繁殖的环境<sup>[19]</sup>。美国地理调查局国家湿地研究中心鱼类与野生生物署将栖息地定义为:给某一特定物种、种群或群落提供直接支持的一个场所,包括该场所中空气质量、水体质量、植被和土壤特征及水体供给等所有的环境特性<sup>[20]</sup>。环境影响评价中,栖息地是指由生物有机体和物理成分组成的一个自然环境,共同为一个生态单元起作用<sup>[20]</sup>。MORRISON等<sup>[21]</sup>认为,栖息地是指生物栖息的生态地理环境。在渔业资源研究中,很重要的一点是要对鱼类栖息地进行研究,其主要内容是栖息环境的变化对生物各种活动的影响<sup>[22]</sup>。近年来,越来越多的研究发现,只考虑非生物因子的影响,会出现一些生物栖息地分布无法解释的现象或斑块,因此一些生物因子也逐渐被考虑进来<sup>[23]</sup>。

栖息地的适宜程度或者好坏,通常可用一种指数来表达,如 HSI<sup>[24]</sup>。在研究中,HSI 取值范围一般为 0~1.0,0 表示不适宜生境,1.0 表示最适宜生境<sup>[2]</sup>。HSI 与其评价程序(habitat evaluation procedures, HEP)被广泛地运用于野生生物的栖息地质量评估,其评估结果在日常的自然资源管理与决策支持中得到广泛应用<sup>[20]</sup>。

## 1.2 HSI 模型建立

通常而言,建立 HSI 模型包括:(1)获取生境资料;(2)构建单因素适宜度函数;(3)赋予生境因子权重;(4)结合多项适宜度指数,计算总 HSI 值;(5)绘制 HSI 分布图<sup>[24]</sup>。从本质上而言,用于构建 HSI 一般都基于以下思路:首先模拟出生物体对各环境要素的适宜性指数(suitability index, SI),然后通过一定的数学方法把各种 SI 关联在一起获得综合 HSI<sup>[22]</sup>。

### 1.2.1 生境资料的获取

分析单个因子对生物分布的影响,是 HSI 研究中最基本的方法<sup>[14-15,25]</sup>。但栖息地是一个非常复杂的生态系统,综合考虑多个因子的影响能更好地解释并预测生物的分布<sup>[26-28]</sup>。然而数据的收集需要大量的人力、物力及时间,不可能将所有的因子都考虑进来。VINCEZI等<sup>[29]</sup>指出,一般而言,给 HSI 模型选择合适的输入因子应遵循以下标准:(1)形态和生化因子必须与生境承载能力(carrying capacity)或经济开发物种的生存或

生长率显著相关;(2)对因子与生境之间的关系有充分的认识;(3)这些因子能以实际且符合成本效益的方法获得。因此,环境因子的选择是至关重要的,这些因子应该被考虑进将来的管理计划中,因为它们能指示出物种的栖息场所<sup>[30]</sup>。

在渔业科学研究中,影响 HSI 的因子有很多,包括非生物因子和生物因子以及人类的影响。不同的研究区域和研究对象及其不同生活史阶段对因子的选择有所不同。综合目前研究情况,海洋渔业资源的 HSI 主要考虑的因子有温度(包括海洋表面温度、海洋表面温度梯度、不同水深温度)、海表盐度、海面高度和叶绿素 a 等<sup>[8-11,13-17,22,29,31-34]</sup>;河口的渔业资源考虑的主要因子有盐度、深度和溶解氧等<sup>[30]</sup>;淡水河流的渔业资源考虑的主要因子有温度、深度和水流等;湖泊中主要考虑的因子有深度、透明度和水化学参数等<sup>[26,35-40]</sup>;底栖生物还考虑沉积物类型和底质等<sup>[29-30,35-39]</sup>。

上述环境因子获取的手段一般包括:(1)遥感环境数据;(2)实地测量数据;(3)实验数据;(4)渔业生产数据;(5)其它间接获取。

### 1.2.2 单因素 SI 函数的构建

HSI 模型的构建通常假设:(1)物种主动选择适宜其生存的生境;(2)物种和环境变量存在线性或者正态分布等关系,这种关系主要来自经验数据、专家判断或二者结合<sup>[24,27,41-42]</sup>。通常所构建的线性函数是分段(broken linear model)的,为了简化 SI 模型,也有不少学者根据历史资料或专家知识直接赋值,而在自然环境中,这种假设的线性关系几乎不存在,因此越来越多的研究者开始根据数理统计知识等模拟生物分布与环境变量之间的关系,从而计算得到影响因子的 SI 曲线。表 1 是作者根据国内外研究现状,对 SI 函数的主要构建方法及其应用进行的总结。

### 1.2.3 因子权重的设置

一般而言,各因子的权重是通过专家知识获得的<sup>[30]</sup>。但在许多研究中,可能缺乏足够的信息给不同的环境变量赋予不同的权重<sup>[32]</sup>。目前,在渔业科学中,大部分 HSI 的应用都将各因子的权重等同对待。然而,VINAGRE等<sup>[30]</sup>认为尽管通过专家知识获得的权重带有一定的主观判断,但这些权重代表了渔业科学研究和管理等从业者的共有知识,因此实际上是被广泛接受的。

表 1 适宜性指数函数的构建及应用  
Tab.1 Application and establishment of habitat suitability index

依据	SI 函数的构建方法	应用对象	参考文献
历史资料与专家知识或二者结合	经验赋值	西北太平洋柔鱼 ( <i>Ommastrephes bartramii</i> ) 桑达斯基河瓦氏吸口鱼 ( <i>Greater Redhorse</i> ) 无脊椎动物襁翅目 ( <i>Plecoptera</i> ) 葡萄牙塔古斯河口鳎 ( <i>Solea solea and Solea senegalensis</i> ) 桑达斯基河大眼梭鲈 ( <i>Sander vitreus</i> )	CHEN 等 <sup>[10]</sup> TOMSIC 等 <sup>[38]</sup> VINAGRE 等 <sup>[30]</sup> GILLENWATER 等 <sup>[37]</sup>
	线性函数	印度洋大眼金枪鱼 ( <i>Thunnus obesus</i> ) 长江中华鲟 ( <i>Acipenser sinensis</i> ) 长江中华鲟 ( <i>Acipenser sinensis</i> ) 布宜诺斯艾利斯牙银汉鱼 ( <i>Odontesthes bonariensis</i> ) 龙须眼子菜 ( <i>Potamogeton pectinatus</i> ) 美洲西鲱 ( <i>Alosa sapidissima</i> ) 欧鳊 ( <i>Salmo trutta</i> ) 大马哈鱼 ( <i>Oncorhynchus tshawytscha</i> ) 条纹狼鲈 ( <i>Morone saxatilis</i> (Walbaum))	陈新军等 <sup>[16]</sup> 易雨君等 <sup>[26,35]</sup> LEE 等 <sup>[28]</sup> 班璇等 <sup>[36]</sup> GÓMEZ 等 <sup>[40]</sup> U. S Fish & Wildlife Service <sup>[42-45]</sup>
数理统计知识	线性回归	印度洋大眼金枪鱼 ( <i>Thunnus obesus</i> )	王家樵 <sup>[8]</sup>
	非线性回归	中西太平洋鲑鱼 ( <i>Katsywonus pelamis</i> ) 地中海马尼拉蛤 ( <i>Tapes philippinarum</i> )	郭爱 & 陈新军 <sup>[14]</sup> 、 VINCEZI 等 <sup>[29]</sup>
	正态分布模型	西北太平洋柔鱼 ( <i>Ommastrephes bartramii</i> )	陈新军等 <sup>[31]</sup>
	分位数回归	西南大西洋阿根廷滑柔鱼 ( <i>Illex argentinus</i> ) 印度洋大眼金枪鱼 ( <i>Thunnus obesus</i> )	冯波等 <sup>[11,13,17]</sup>
	指数多项式模型	奥扎克山脉溪流小龙虾 ( <i>Orconectes neglectus</i> )	GORE 和 RYANT <sup>[39]</sup>

1.2.4 HSI 的计算

常用的 HSI 计算方法有:

连乘法 (continued product model, CPM)

<sup>[16]</sup>:

$$H = \prod_{i=1}^n S_i \quad (1)$$

最小值法 (minimum model, MINM) <sup>[26,28]</sup>:

$$H = \text{Min}(S_1, S_2, \dots, S_n) \quad (2)$$

最大值法 (maximum model, MAXM) <sup>[14]</sup>:

$$H = \text{Max}(S_1, S_2, \dots, S_n) \quad (3)$$

几何平均法 (geometric mean model, GMM) <sup>[32,38]</sup>:

$$H = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n S_i} \quad (4)$$

算术平均法 (arithmetic mean model, AMM) <sup>[22]</sup>:

$$H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \quad (5)$$

混合算法 <sup>[11]</sup>:

$$H = \text{Max} \{ \text{Min}(S_1, S_2, \dots, S_n)_1, \dots, \text{Min}(S_1, S_2, \dots, S_n)_j \} \quad (6)$$

赋予权重的几何平均值算法 (weighted geometric mean, WGM) <sup>[29]</sup>:

$$H = \left( \prod_{i=1}^n S_i^{w_i} \right)^{\sum_{i=1, \dots, n} w_i} \quad (7)$$

赋予权重的算术平均值算法 (weighted mean

model, WMM) <sup>[46]</sup>:

$$H = \frac{1}{\sum_{i=1, \dots, n} w_i} \sum_{i=1}^n w_i S_i \quad (8)$$

式中:  $H$  为栖息地适应性指数  $HSI$ ;  $i$  为因子序号;  $n$  为影响因子总数;  $S_i$  为第  $i$  个影响因子的 SI 值;  $w_i$  为第  $i$  个因子的权重或权数;  $j$  为第  $j$  生活史阶段或第  $j$  时间段。

最基本的算法为前 5 种, 陈新军等<sup>[16]</sup>、郭爱和陈新军<sup>[14]</sup>、CHEN 等<sup>[9-10]</sup> 分别就印度洋大眼金枪鱼、中西太平洋鲑鱼、西北太平洋柔鱼及东中国海鲑鱼进行了模型比较(表 2)。CPM 和 MINM 估计结果较为保守, CPM 对零值很敏感, 其中一个因子 SI 值为零, 则综合 HSI 为零, 目前渔业 HSI 研究中很少独立运用 CPM, 少数陆生生态系统研究中会加入 HSI 的混合算法中<sup>[46-47]</sup>。MINM 受最小 SI 因子的限制, 因为 HSI 决定于各因子中 SI 的最小者, 在渔业中常被运用于保护区的设立与评估及生态系统养护与管理中<sup>[26,35]</sup>。MAXM 取各 SI 的最大值, 对结果作出了较为乐观的估计, 因此常被运用于中心渔场的预测。AMM 和 GMM 是目前渔业 HSI 中运用最为广泛的算法, 常被用来作资源量的估算与渔场分析<sup>[10,32,37]</sup>, 但这两种算法也都存在各自的利弊(表 2)。但是, TERREL<sup>[48]</sup> 建议 GMM 模型中使用的参数越少越好, LAYHER 等<sup>[49]</sup> 指出这种方法

并不能很好地模拟生物体与各环境因子之间的综合关系。

表 2 栖息地适宜性指数不同模型优缺点比较

Tab. 2 Advantages and disadvantages of different habitat suitability index models

模型	优点	缺点	应用情况
连乘法 GPM	估计结果保守	对零值敏感	无
最小值法 MINM	估计结果较保守	受最小 SI 因子的限制	保护区、生态养护管理
最大值法 MAXM	估计结果较乐观	受最大 SI 因子的限制	中心渔场的预测
算术平均值法 AMM	估计结果较折中,不受 SI 极值的影响	将各 SI 值同等对待,未考虑单因素 SI 偏小或偏大的影响	资源量估算、渔场分析
几何平均值法 GMM	估计结果较折中,考虑了单因素 SI 值偏小或偏大的影响	估计效果低于算术平均法,参数越少越好,受 SI 零值影响较大	资源量估算、渔场分析

以上模型都是针对单因子 SI 构建的,忽视了因子之间的交互作用对生物分布的影响。王家樵<sup>[22]</sup>、冯波等<sup>[13]</sup>利用分位数回归法(quantiles regression, QR)对大眼金枪鱼进行了研究,计算出各因子及其交互作用因子与大眼金枪鱼分布之间的关系,进一步求出 HSI,输出结果能较好的预测生物分布。此外,在陆生生态系统中,也出现了一些构建 HSI 的其他模型与算法,如模糊 HSI 模型(fuzzy HSI model)<sup>[3]</sup>、模糊神经网络(Fuzzy neural network model, FNN)<sup>[50]</sup>和二项逻辑斯蒂克模型<sup>[51]</sup>。

### 1.2.5 HSI 分布图绘制

为了使输出结果更为直观,研究者一般采用一些绘图软件(如 ArcGIS、Marine Explorer 等)或编程软件(如 Matlab、R 语言等)将结果可视化,把 HSI 从 0~1.0 划分成不同的等级,并给栖息地命以不同的适合度,如不适宜、一般适宜、中等适宜、较适宜、最适宜等。

### 1.3 HSI 模型检验

模型检验一般包括模型校正(calibration)、验证(verification)和实证(validation)<sup>[20]</sup>。美国地理调查局国家湿地研究中心鱼类与野生生物署虽然建立了许多野生生物和鱼类的 HSI 模型,但是很少对其模型进行检验,从而在一定程度上影响了该模型的发展与应用。

研究者通常假设高质量栖息地能得到较高的 HSI 值(如 0.7~1.0),低质量栖息地得到较低的 HSI 值(如 0~0.3),然而计算结果很可能没有覆盖 0~1.0 的整个范围。BROOKS<sup>[20]</sup>研究中,没有经过校正的 HSI 模型通常所产生的值在 0.3~0.7 间,这在栖息地质量识别中是不允许的,同时他指出模型校正的方法主要有:(1)敏感性分

析(sensitivity analysis)。该方法允许研究者校正个别值及改变用于计算整个 HSI 值的等式;(2)模拟法(simulation)。使用专家知识及仔细审议整个模型和内部变量的行为来模拟所产生的影响或管理行为,这种方法是 HEP 的典型运用,然而在这些模拟中经常会出现修正的模型并不能做出预期的反应,如果主要的影响或行为不能引起 HSI 值的变化,那么该模型可能并不合适。

LEE 等<sup>[28]</sup>认为,模型验证直接关系到模型的可信度或精度。模型校正之后应选用独立的种群密度数据对模型加以验证。在渔业科学中,越来越多的学者用最新的实际测量的渔业密度数据或独立于渔业的种群丰度数据对模型加以验证<sup>[10,30,32,37]</sup>。

HSI 模型并不具有普适性<sup>[26]</sup>,即对某一特定生物所建立的 HSI 模型不一定适宜其他生物,因此如果假设 HSI 模型将用于来自各种生态区域的所有的野生生物和鱼类物种是不现实的。同时,在一个经过校正和验证的模型中,如果在其运用过程中存在中度风险时,用一新的模型构建方法更为合适<sup>[20]</sup>。

尽管模型检验显得十分重要,但在自然界中,独立种群密度数据的收集往往很困难,且耗时耗力耗财,特别对濒危物种数据的收集显得尤为困难,因此对模型进行独立数据的检验就很难进行。

## 2 HSI 在渔业科学中的应用

### 2.1 HSI 在内陆渔业中的应用

HSI 在内陆河流及湖泊渔业中运用较为广泛,主要用于水生生物的保护与管理。

美国地理调查局国家湿地研究中心鱼类与

野生生物署对美洲西鲱(*Alosa sapidissima*)<sup>[42]</sup>、欧鳊(*Salmo trutta*)<sup>[43]</sup>、大马哈鱼(*Oncorhynchus tshawytscha*)<sup>[44]</sup>和条纹狼鲈(*Morone saxatilis*)<sup>[45]</sup>不同的生活史阶段栖息地适宜性进行了研究,不同的生活史阶段选取的影响因子不同,根据历史资料建立各阶段各因子的SI函数(一般为分段函数),用MINM或AMM构建HSI模型,从而为渔业资源的有效管理提供了决策支持。

GORE和BRYANT<sup>[39]</sup>利用水流、水深和底质研究了奥扎克(Ozark,美国密苏里州)山脉溪流中小龙虾(*Orconectes neglectus*)的适宜栖息地的时空变化,利用液压应力模型(hydraulic stress models)计算粘性底层厚度,用指数多项式模型(exponential polynomial models)分别建立了小龙虾不同生活史阶段(稚鱼、成鱼、怀卵)的水流、底质及粘性底层厚度的SI曲线。结果表明,小龙虾不同生活史阶段的适宜栖息地有所不同,这将为丰度预测及生境管理提供决策支持。

GILLENWATER等<sup>[37]</sup>利用水深、水流和底质等因子研究了桑达斯基河大眼梭鲈(*Sander vitreus*)的产卵栖息地适宜性,基于Saskatchewan渔业实验室的研究结果,赋予水深和水流的SI值(0、0.2、0.6和1),底质SI假设在研究时间内部恒定不变,再利用GMM建立综合HSI模型。结果表明,卵的密度与HSI显著正相关,且栖息地适宜性依赖于河流流量,并在流量为20~25 m<sup>3</sup>/s时达到最大。

TOMSIC等<sup>[38]</sup>利用底质、水深和水流研究了桑达斯基河(Sandusky River,美国俄亥俄州)瓦氏吸口鱼(*Greater Redhorse*)和无脊椎动物襁翅目(Plecoptera)在圣约翰水库拆除前后的适宜栖息地,分别对这两个目标物种的各影响因子SI给予经验赋值,然后用GMM分别构建HSI模型。结果表明,这两个目标物种栖息地适宜性在水库拆除后相比于之前有了明显提高。

LEE等<sup>[28]</sup>利用水体透明度、风区长度、磷酸盐浓度和水深对荷兰艾瑟尔湖龙须眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)的HSI模型的不确定性进行了分析。由专家知识得出各因子的SI,再利用MINM建立综合HSI模型,利用蒙特卡罗(Monte Carlo)模拟分析该模型的不确定性,结果表明由专家知识估计的HSI模型功能具有很大的不确定性,且这种不确定性在SI取中间值

(0.4~0.6)时最大。

GÓMEZ等<sup>[40]</sup>在前人研究的基础上,利用水化学参数、持续水温、孵化水温、DO、PH、氨氮及电导率等7个因子研究了布宜诺斯艾利斯牙银汉鱼(*Odontesthes bonariensis*)的物理化学生境,其中水化学参数包括总溶解性固体(TDS)和化学需氧量等10个因子,并用AMM建立WP的SI,各因子的SI曲线基于历史研究资料得出,最终的水质指数利用AMM和GMM相结合计算得到。该研究结果为牙银汉鱼的人工或自然环境下的养殖确定了允许的最优条件。

易雨君等<sup>[35]</sup>对长江中华鲟(*Acipenser sinensis*)栖息地模型进行了研究,根据成鱼、产卵及孵化个体的适宜环境的不同,依据历史资料得出不同时期各因子(10个)的SI曲线,再用最小值法(MINM)得出不同时期鲟鱼的SI,最后依然采用MINM得出鲟鱼的综合HSI模型,并用第二年的实测数据对模型进行验证。结果表明上述模型的计算结果与中华鲟产卵日期日均产卵量符合比较好,可以用来评价中华鲟栖息地。易雨君等<sup>[26]</sup>进一步利用该模型结合二维κ-ε紊流数学模型对中华鲟产卵场适合度进行了研究,得出葛洲坝至虎牙滩河段中华鲟产卵的适合程度。班璇等<sup>[36]</sup>参照国内不同领域鱼类专家对中华鲟产卵栖息地的物理变量范围研究,分别用专家建议法和实测法绘制了葛洲坝下游中华鲟在不同生长阶段(产卵、孵化、仔鱼)需求的栖息地各环境变量所对应的栖息地适宜度曲线,结果显示了葛洲坝下游中华鲟产卵场不同生长阶段中华鲟对不同栖息地变量所需求的最佳适宜值,分析得出了影响中华鲟产卵场的主要生态因素有水温、水深、底质、水流、退水率、含沙量、DO和繁殖季节的食卵鱼数等。

LI等<sup>[46]</sup>对湘西河大型栖息无脊椎动物(四节蜉属(*Baetis*))的适宜栖息地进行了研究,利用水深、水流和底质等环境因子,根据经验知识和历史研究得到各因子的SI,并依据历史资料和层次分析原理(principle of level analysis),结合水文学方法(hydrological method)和权重使用面积方法(weighted usable area(WUA) method)构建了基于水文学、生物物种和生态系统的3个分层次的内陆河流环境流量模型,得出了浅滩是该区域大型底栖动物最适宜栖息地的结论。

综合 HSI 在内陆渔业中的应用情况,发现大多数是针对研究对象的不同生活史阶段来进行研究的,并选取了不同的环境因子。同时,SI 函数的构建大多数基于历史资料的分线段函数和基于专家知识的经验赋值。HSI 模型的构建通常采用 MINM,较少采用 GMM 等模型,一些耦合模型也开始出现。近年来,通常被忽视的模型检验过程也得到了重视,并尽可能采用实测的资源密度数据对模型进行验证。

## 2.2 HSI 在海洋渔业中的应用

HSI 在海洋渔业中的运用起步较晚,近年来研究较多,主要用于渔场分析、资源量估算及生态管理等。

VINCEZI 等<sup>[29]</sup>利用沉积物、DO、盐度、水深和 Chl-a 等因子对地中海马尼拉蛤 (*Tapes philippinarum*) 栖息地进行了研究,用历史资料构建了各因子的 SI 方程(非线性),根据专家知识设定各因子的权重,采用权重几何平均模型(WGMM)建立 HSI 模型,最后利用由实验观测值产生的分段函数将 HSI 值转换为每年的潜在产量估计值。该模型为管理者提供了不同地点马尼拉蛤的潜在经济产量,这一合理快速且符合成本效益的方法为竞争者之间的渔获物公平分配提供了基础,且显著提高了决策过程的透明度。

VINAGRE 等<sup>[30]</sup>利用水深、温度、盐度、底质、潮间带泥滩的出现、端足目密度、多毛类密度和双壳类密度等因子研究了葡萄牙塔古斯河口的欧洲鳎 (*Solea solea*) 及塞内加尔鳎 (*Solea senegalensis*) 的适宜栖息地,分别对各环境因子 SI 给予经验赋值(0、0.1、0.5 和 1),然后用 GMM 分别建立基于非生物因子的 HSI 模型、基于端足目和非生物因子的 HSI 模型、基于多毛类和非生物因子的 HSI 模型和基于双壳类和非生物因子的 HSI 模型,并与两种鳎的密度分布进行对比。结果表明基于端足目和非生物因子的 HSI 模型能较好的模拟欧洲鳎的密度分布,基于多毛类和非生物因子 HSI 模型能较好的模拟塞内加尔鳎的密度分布。

CHEN 等<sup>[10]</sup>利用遥感获取的表温、表层盐度、海面高度距平值和 Chl-a 数据对东中国海鲈鱼 (*Scomber japonicus*) 进行了研究,用 4 种不同方法(CPM、MINM、AMM 和 GMM)构建 HSI 模型,以 AIC(Akaike's information criterion)作为模型

选择标准进行模型选择标准,结果表明 AMM 模型能可靠预测鲈鱼栖息地。

CHEN 等<sup>[9]</sup>利用遥感环境数据,包括表温、表层盐度、海面高度距平值和 Chl-a 对西北太平洋柔鱼 (*Ommastrephes bartramii*) 栖息地进行了研究,用不同的环境变量组合方法,分别用 AMM 和 GMM 构建 HSI 模型,用 AIC 值选择最适栖息地模型,结果表明结合表温、海面高度距平值和 Chl-a 等环境因子的 AMM 模型能很好地预测柔鱼的适宜生境。陈新军等<sup>[31]</sup>利用表温及表温水平梯度对该柔鱼栖息地的进行了进一步研究,利用正态分布模型分别建立了基于作业次数和基于 CPUE 的 SI 方程,取其平均值后,利用 AMM 和 GMM 构建了柔鱼综合 HSI 模型。研究表明,基于表温和表温水平梯度的 AMM 构建的 HSI 模型能较好地预测西北太平洋柔鱼中心渔场。Tian 等<sup>[32]</sup>以捕捞努力和 CPUE 作为丰富度指标,利用表温、35 m 层水温、317 m 层水温、表层盐度、海面高度等环境因子,SI 模型中采用样条平滑回归,进一步利用 GMM 得出基于捕捞努力量的 HSI 模型和基于 CPUE 的 HSI 模型,并对其进行比较验证。结果表明,基于捕捞努力量的 HSI 模型能更好地定义该柔鱼的最适栖息地。

冯波等<sup>[11]</sup>利用温度、盐度、海面高度、SLH、Chl-a 和表层盐差等环境因子对西南大西洋阿根廷滑柔鱼 (*Illex argentinus*) 栖息地进行了研究,采用 QR 方法建立各因子的 SI 方程,然后利用小中求大原则,即选取不同环境变量拟合预测出的 SI 最小值,但同一地点选取过去几年中最小值中的最大值(MAX(MIN)M)构建 HSI 模型,该研究成功揭示了西南大西洋阿根廷滑柔鱼栖息地的分布模式。

冯波等<sup>[17]</sup>利用 0~300 m 水层的加权平均水温、50~150 m 水层的温差和氧差对印度洋大眼金枪鱼 (*Thunnus obesus*) 栖息地进行了研究,用 QR 方法分别建立各环境变量与钓获率的最佳上界 QR 方程,从而计算各因子的 SI,最后利用 GMM 建立综合 HSI 模型,成功揭示了印度洋大眼金枪鱼栖息地的分布模式。陈新军等<sup>[16]</sup>利用 0~300 m 的加权平均水温、S、DO 和温跃层深度对其作了进一步研究,先根据环境变量值对应的作业频次结合专家知识绘制出各环境变量的 SI 曲线,用 CP、MINM、AMM 和 GMM 建立综合 HSI

模型,以 AIC 作为模型选择标准,结果表明 MINM 拟合度最好,给出了较为严格的栖息地适宜性指数估计。但实证分析表明,AMM 和 GMM 指示的 HSI 值能较好的估计该鱼种的渔获地点和渔获频次。王家樵等<sup>[8]</sup>利用 T、S、DO 和温跃层深度 4 个因子对该金枪鱼栖息地进行了研究,先用线性回归模型对渔获率和各环境要素进行回归分析,从而得到各环境要素的大眼金枪鱼 SI,进一步用 GMM 建立综合 HSI 模型,并用 GIS 对该物种栖息地分布进行了图形显示,得出了最适合栖息的海域及其他海域的适合度程度。冯波等<sup>[13]</sup> 0~300 m 水层的加权平均水温、50~150 m 水层的温差和氧差 3 个环境变量,再考虑其交互变量,用 QR 法,建立多环境变量及其相互作用变量与渔获率的最佳上界 QR 方程,进一步计算出 HSI,用 GIS 绘制出各月 HSI 分布图,结果表明:该方法能较好的预测大眼金枪鱼资源分布。

郭爱和陈新军<sup>[14]</sup>利用水温垂直结构对中西太平洋鲷鱼(*Katsuwonus pelamis*)栖息地进行了研究,采用一元非线性方程建立表温等 5 个水温因子与 SI 之间的关系,然后采用 CPM、MINM、MAXM、AMM 和 GMM 方法建立的 HSI 模型,并对其进行了比较,结果表明,用 MAXM 构建的 HSI 模型更能反映中心渔场的分布状况。

综合 HSI 在海洋渔业中的应用情况,发现大部分研究人员利用生产统计数据构建 SI 函数,利用 HSI 的 5 种基本方法进行计算,并采用 AIC 等标准筛选出最优模型。由于生物资源丰度数据获取的存在一定的困难,特别是商业渔业,很少对研究对象的不同生活史阶段进行独立研究。随着遥感(RS)和地理信息系统(GIS)的发展,利用遥感环境数据在大尺度范围内为研究海洋生物的栖息地提供了支持。

### 3 分析与展望

综上所述,HSI 理论和方法在渔业科学中得到很好的应用,特别是随着 GIS 技术的发展以及在渔业领域的应用,HSI 并将成为渔业资源评估、管理与保护,以及渔场分析等重要工具和手段。但是,目前在 HSI 模型研究和应用过程中,还有许多需要完善的地方。比如,如何提高 HSI 模型的准确性。HSI 的不确定性主要来源于 4 个方面:(1)生境资料获取的全面性及客观性。HSI

模型中环境变量数目及形式的选择是鉴定最适生境是否的关键,对生物空间分布影响不显著的因子或因子过多的包含在 HSI 模型中,可能会混淆 HSI 模型的建立<sup>[32]</sup>,同时影响因子数据的收集也是项很浩大的工程,因子的选择虽然有学者提出适当的标准<sup>[29]</sup>,但仍然有可能漏掉对生物分布影响很重要的因子,从而很难解释一些生物斑块的出现。一般而言,要求输入的因子能够准确反映生物的时空分布,尽可能包含所有与之显著相关的因子,同时摒弃与之不相关或相关性较小的因子;(2)SI 曲线的可靠性。SI 曲线的获得依赖于历史资料、野外经验和专家判断;(3)输入数据的代表性。要求样本必须能够反映总体数据的分布特性,需要模型验证以降低输入数据的不确定性;(4)HSI 模型的结构。针对同一数据,用不同的模型评价得到的结果可能有显著的差异<sup>[16]</sup>。

尽管 HSI 模型存在着一定的问题和局限性,但其优越性也是其他生境模型所无法相比的<sup>[24]</sup>。HSI 能够指示生物的最适环境条件、预测生物分布、估算资源量及评价生物生境适宜度等等,从而在保护区的建立与评价、渔场分析、资源量估算和生态养护与管理等方面做出贡献,因此,HSI 在渔业中的应用受到了保护者、立法者、管理者及广大渔民的关注与重视。

综合国内外研究现状及其存在问题,国内渔业界应加大对 HSI 模型的研究以及在渔业科学中的应用,同时在 HSI 研究和应用过程中,要考虑以下问题:(1)充分了解研究对象生活史过程及其生物学特性,以及其所处的环境;(2)针对不同生长阶段和外部环境,选择合适的环境因子及其数据;(3)进行各因子时间和空间标准的研究,建立环境因子等数据的采集规范和标准;(4)根据历史资料和专家知识赋予各因子的权重,并通过合适的优化算法设定最优权重;(5)针对不同目标(保护区、中心渔场、生物量估算等),选择合适的模型;(6)通过各种模型的分析,选择合适的 HSI 模型;(7)利用实测数据和最新资料,对模型进行不断改进与修正,以提高模型的精度。

### 参考文献:

- [1] 朱宏达. 南部地区六种石龙子科蜥蜴栖息地利用之研究[D]. 台北:国立中山大学,2002: 8-9.
- [2] U. S. Fish and Wildlife Service. Standards for the develop-

- ment of habitat suitability index models[R]. U. S. Fish and Wildlife Service, 1981: 1-81.
- [3] RÜGER N, SCHLÜTER M, MATTHIES M. A fuzzy habitat suitability index for *Populus euphratica* in the Northern Amudarya delta (Uzbekistan) [J]. *Ecological Modelling*, 2005, 184(2-4): 313-328.
- [4] BRAMBILLA M F, CASALE V, BERGERO G, *et al.* GIS-models work well, but are not enough; Habitat preferences of *Lanius collurio* at multiple levels and conservation implications[J]. *Biological Conservation*, 2009, 142(10): 2033-2042.
- [5] IMAM E, KUSHWAHA S P S, SINGH A. Evaluation of suitable tiger habitat in Chandoli National Park, India, using spatial modelling of environmental variables[J]. *Ecological Modelling*, 2009, 220(24): 3621-3629.
- [6] NISHIDA T, BIGELOW K, MOHRI M, *et al.* Comparative study on Japanese tuna longline CPUE standardization of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the Indian ocean based on two methods: general linear model (GLM) and habitat-based model (HBM)/GLM combined [J]. *IOTC Proceedings*, 2003, 6: 48-69.
- [7] LEE P F, CHEN I C, TZENG W N. Spatial and Temporal Distribution Patterns of Bigeye Tuna (*Thunnus obesus*) in the Indian Ocean[J]. *Zoological Studies*, 2005, 44(2): 260-270.
- [8] 王家樵. 印度洋大眼金枪鱼栖息地指数模型研究[D]. 上海: 上海水产大学, 2006: 1-40.
- [9] CHEN X J, TIAN S Q, CHEN Y, *et al.* A modeling approach to identify optimal habitat and suitable fishing grounds for neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the Northwest Pacific[J]. *Fishery Bulletin*, 2010, 108: 1-14.
- [10] CHEN X J, LI G, FENG B, *et al.* Habitat suitability index of Chub mackerel (*Scomber japonicus*) in the East China Sea [J]. *Journal of Oceanography*, 2009, 65(1): 93-102.
- [11] 冯波, 田思泉, 陈新军. 基于分位数回归的西南太平洋阿根廷滑柔鱼栖息地模型研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2010, 124(1): 15-22.
- [12] 陈新军, 刘必林, 田思泉, 等. 利用基于表温因子的栖息地模型预测西北太平洋柔鱼渔场[J]. *海洋与湖沼*, 2009, 40(6): 707-713.
- [13] 冯波, 陈新军, 许柳雄. 多变量分位数回归构建印度洋大眼金枪鱼栖息地指数[J]. *广东海洋大学学报*, 2009, 29(3): 48-52.
- [14] 郭爱, 陈新军. 利用水温垂直结构研究中西太平洋鳀鱼栖息地指数[J]. *海洋渔业*, 2009, 31(1): 1-9.
- [15] 郭爱, 陈新军. 基于表温的中西太平洋鳀鱼栖息地适应指数研究[J]. *大连水产学院学报*, 2008, 23(6): 445-461.
- [16] 陈新军, 冯波, 许柳雄. 印度洋大眼金枪鱼栖息地指数研究及其比较[J]. *中国水产科学*, 2008, 15(2): 269-278.
- [17] 冯波, 陈新军, 许柳雄. 应用栖息地指数对印度洋大眼金枪鱼分布模式研究[J]. *水产学报*, 2007, 31(6): 805-812.
- [18] 全国科学技术名词审定委员会. 生态学名词[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 52-53.
- [19] National Research Council. Impacts of emerging agricultural trends on fish and wildlife habitats[M]. Washington, D. C.: National Academy, 1982. 1-333.
- [20] BROOKS R P. Improving habitat suitability index models[J]. *Wildlife Society Bulletin*, 1997, 25(1): 163-167.
- [21] MORRISON M L, MARCOT B C, MANNAN R W. Wildlife-habitat relationship: concepts and applications [M]. Madison: University of Wisconsin Press, 1998.
- [22] 王家樵. 基于分位数回归的印度洋大眼金枪鱼栖息地适宜性指数模型研究[D]. 上海: 上海水产大学, 2006: 1-44.
- [23] LE Pape O L, BAULIER A, CLOAREC J, *et al.* Habitat suitability for juvenile common sole (*Solea solea*, L.) in the Bay of Biscay (France): A quantitative description using indicators based on epibenthic fauna [J]. *Journal of Sea Research*, 2007, 57(2-3): 126-136.
- [24] 金龙如, 孙克萍, 贺红士, 等. 生境适宜度指数模型研究进展[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(5): 841-846.
- [25] SCHAEFFER B A, MORRISON J M, KAMYKOWSKI D, *et al.* Phyto-plankton biomass distribution and identification of productive habitats within the Galapagos Marine Reserve by MODIS, a surface acquisition system, and in-situ measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(6): 3044-3054.
- [26] 易雨君, 王兆印, 姚仕明. 栖息地适合度模型在中华鲟产卵场适合度中的应用[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2008, 48(3): 340-343.
- [27] THORMASMA L E, DRUMMER T D, PETERSON R O. Testing the habitat suitability index model for the fisher[J]. *Wildlife Society Bulletin*, 1991, 19(3): 291-297.
- [28] LEE G E M V, MOLEN D T V, BOOGAARD H F P V, *et al.* Uncertainty analysis of a spatial habitat suitability model and implications for ecological management of water bodies [J]. *Landscape Ecology*, 2006, 21: 1019-1032.
- [29] VINCENZI S, CARAMORI G, ROSSI R, *et al.* A GIS-based habitat suitability model for commercial yield estimation of *Tapes philippinarum* in a Mediterranean coastal lagoon (Sacca di Goro, Italy) [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 193(1-2): 90-104.
- [30] VINAGRE C, FONSECA V, CABRAL H, *et al.* Habitat suitability index models for the juvenile soles, *Solea solea* and *Solea senegalensis*, in the Tagus estuary: Defining variables for species management[J]. *Fisheries Research*, 2006, 82(1-2): 140-149.
- [31] 陈新军, 刘必林, 田思泉, 等. 利用基于表温因子的栖息地模型预测西北太平洋柔鱼 (*Ommastrephes bartramii*) 渔场[J]. *海洋与湖沼*, 2009, 40(6): 707-713.
- [32] TIAN S Q, CHEN X J, CHEN Y, *et al.* Evaluating habitat suitability indices derived from CPUE and fishing effort data for *Ommastrephes bartramii* in the northwestern Pacific Ocean



- [J]. Fisheries Research, 2009, 95(2-3): 181-188.
- [33] 王学锋, 李纯厚, 廖秀丽, 等. 北部湾浮游幼虫群落结构及其环境适应性分析[J]. 上海海洋大学学报, 2010, 19(4): 529-534.
- [34] 田思泉, 陈新军, 冯波, 等. 西北太平洋柔鱼资源丰度与栖息环境的关系及其时空分布[J]. 上海海洋大学学报, 2009, 18(5): 586-592.
- [35] 易雨君, 王兆印, 陆永军. 长江中华鲟栖息地适合度模型研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(4): 538-543.
- [36] 班璇, 李大美, 李丹. 葛洲坝下游中华鲟产卵栖息地适宜度标准研究[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2009, 42(2): 172-177.
- [37] GILLENWATER D, GRANATA T, ZIKA U. GIS-based modeling of spawning habitat suitability for walleye in the Sandusky River, Ohio, and implications for dam removal and river restoration[J]. Ecological Engineering, 2006, 28(3): 311-323.
- [38] TOMSIC C A, GRANATA T C, MURPHY R P, *et al.* Using a coupled eco-hydrodynamic model to predict habitat for target species following dam removal [J]. Ecological Engineering, 2007, 30(3): 215-230.
- [39] GORE J A, BRYANT R M. Temporal shifts in physical habitat of the crayfish, *Orconectes neglectus* (Faxon) [J]. Hydrobiologia, 1990, 199(2): 131-142.
- [40] GÓMEZ S, MENNI R, NAYA J, *et al.* The physical-chemical habitat of the Buenos Aires pejerrey, *Odontesthes bonariensis* (Teleostei, Atherinopsidae), with a proposal of a water quality index[J]. Environmental Biology of Fishes, 2007, 78(2): 161-171.
- [41] HORNE B V. Density as a misleading indicator of habitat quality[J]. Journal of wildlife management, 1983, 47(4): 893-901.
- [42] U. S. Fish and Wildlife Service. Habitat suitability index models and instream flow suitability curves: American Shad [R]. Biological report, 1985.
- [43] U. S. Fish and Wildlife Service. Habitat suitability index models and instream flow suitability curves: Brown Trout [R]. Biological report, 1986.
- [44] U. S. Fish and Wildlife Service. Habitat suitability index models and instream flow suitability curves: Chinook Salmon [R]. Biological report, 1986.
- [45] U. S. Fish and Wildlife Service. Habitat suitability index models and instream flow suitability curves: inland stocks of Striped Bass [R]. Biological report, 1984.
- [46] LI F Q, CAI Q H, HU X C, *et al.* Construction of habitat suitability models (HSMs) for benthic macroinvertebrate and their applications to instream environmental flows: A case study in Xiangxi River of Three Gorges Reservoir region, China[J]. Progress in Natural Science, 2009(19): 359-367.
- [47] WAKELEY J S. A method to create simplified versions of existing habitat suitability index (HSI) models [J]. Environmental Management, 1988, 12(1): 79-83.
- [48] TERREL J W. Proceedings of the Workshop on fish habitat suitability index models [R]. Biological report, 1984.
- [49] LAYHER W G, MAUGHAN O E. Spotted bass habitat evaluation using an unweighted geometric mean to determine HSI values [J]. Proceedings of the Oklahoma Academy of Science, 1985, 65: 11-17.
- [50] FUKUDA S, HIRAMATSU K, MORI M. Fuzzy neural network model for habitat prediction and HEP for habitat quality estimation focusing on Japanese medaka (*Oryzias latipes*) in agricultural canals [J]. Paddy and Water Environment, 2006, 4(3): 119-124.
- [51] 孔博, 张树清, 张柏, 等. 遥感和 GIS 技术的水禽栖息地适宜性评价中的应用 [J]. 遥感学报, 2008, 12(6): 1001-1009.

## Review on habitat suitability index in fishery science

GONG Cai-xia<sup>1</sup>, CHEN Xin-jun<sup>1, 2, 3</sup>, GAO Feng<sup>1, 2, 3</sup>, GUAN Wen-jiang<sup>1, 2, 3</sup>, LEI Lin<sup>1, 2, 3</sup>

(1. *College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*; 2. *Key Laboratory of Shanghai Education Commission for Oceanic Fisheries Resources Exploitation, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*; 3. *Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*)

**Abstract:** Habitat suitability index (HSI) has been widely used in fishery resources exploitation, management, assessment and protection since it was found in the early 1980s, and it has become one of the most important tools in fishery science research. In this article, outlining the studies in the world, the theory and methods of HSI, and the advance applications and exist problems have been summarized. Some advice should be considered sufficiently in the application of HSI, i. e. , (1) study on target species' life history and biological characteristics and its habitats; (2) suitable environment factors should be selected according to different growth stages; (3) research on spatial-temporal scales of data and rule set on data; (4) selecting logical weights upon different factors based on literature and expert knowledge; (5) selecting preparatory HSI models be propitious to the various goals, such as protection area, fishing ground and biomass evaluation; (6) selecting suitable HSI models by comparison of models and related analysis; (7) modifying models using in-situ or recent data in order to improve precision of model.

**Key words:** habitat suitability index; model development; fishery sciences