海洋渔业科学与技术



栖息地理论在海洋渔业中的应用

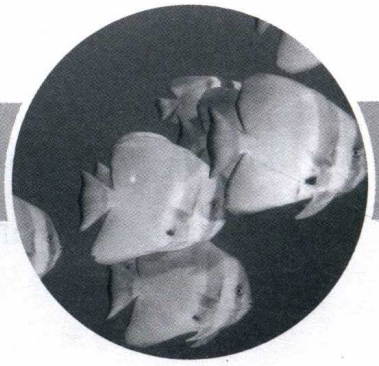
陈新军　龚彩霞　田思泉　官文江　李　纲◎编著

QIXIDI LILUN
ZAI HAIYANG YUYE ZHONG DE
YINGYONG

海洋出版社

海洋渔业科学与技术

本专著得到上海市高峰高原Ⅱ类（水产学）的资助



栖息地理论
在海洋渔业中的应用

陈新军　龚彩霞　田思泉　官文江　李　纲◎编著

海洋出版社

2019年·北京

图书在版编目（CIP）数据

栖息地理论在海洋渔业中的应用/陈新军等编著. —北京：海洋出版社，2019.6

ISBN 978-7-5210-0356-7

Ⅰ.①栖… Ⅱ.①陈… Ⅲ.①栖息地-地理学-应用-海洋渔业-水产资源-研究 Ⅳ.①S931

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 099106 号

责任编辑：赵 武 黄新峰

责任印制：赵麟苏

海洋出版社 出版发行

http：//www.oceanpress.com.cn

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编：100081

中煤（北京）印务有限公司印刷 新华书店发行所经销

2019 年 6 月第 1 版 2019 年 6 月北京第 1 次印刷

开本：787 mm×1092 mm 1/16 印张：23.5

字数：410 千字 定价：68.00 元

发行部：62132549 邮购部：68038093 总编室：62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

序

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。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。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。近年来，HSI 模型也被应用于鱼类分布、中心渔场预报等方面。

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，本专著收集和归纳 10 多年来，本团队在鱿鱼、鲐鱼、金枪鱼等重要经济种类栖息地指数在资源渔场应用研究方面的成果，借以推进 HSI 在我国海洋渔业科学的应用以及研究水平的提高。

本专著共分 4 章，第一章为栖息地一般理论和方法，并提出建立栖息地指数模型应注意的关键技术问题；第二章为栖息地指数在大洋性柔鱼类资源渔场中的应用，重点是在北太平洋柔鱼、东南太平洋茎柔鱼、西南大西洋阿根廷滑柔鱼以及印度洋鸢乌贼等四个重要经济种类中的应用；第三章为栖息地指数在金枪鱼类资源渔场中

的应用，主要包括印度洋金枪鱼、南太平洋长鳍金枪鱼、中西太平洋鲣鱼以及东太平洋黄鳍金枪鱼等重要经济种类；第四章为栖息地指数在近海鲐鱼的应用，包括多种数据源下鲐鱼栖息地模型、水温变动对东黄海鲐鱼栖息地的影响等。

该专著的出版，有利于栖息地研究方法和研究手段的发展。该专著可供从事水产界、海洋界的科研、教学等科学工作者和研究单位使用，是一本很好的参考书。

由于时间仓促，覆盖内容广，国内没有同类的参考资料，因此难免会存在一些错误。望各读者提出批评和指正。

作者

2018 年 10 月 16 日

目　录

第一章　栖息地理论和方法 …… (1)
第一节　基本概念与方法 …… (1)
第二节　国内外研究现状 …… (8)
第三节　栖息地指数模型建立的几个关键技术问题 …… (13)
第二章　栖息地指数在大洋性柔鱼类资源渔场中的应用 …… (16)
第一节　栖息地指数在北太平洋柔鱼资源渔场中的应用 …… (16)
第二节　栖息地指数在东南太平洋茎柔鱼资源渔场中的研究 …… (82)
第三节　栖息地指数在西南大西洋阿根廷滑柔鱼资源渔场中的应用 ……
…… (136)
第四节　栖息地指数在印度洋鸢乌贼渔场中的应用 …… (171)
第五节　基于栖息地指数的西北太平洋柔鱼渔获量估算 …… (179)
第三章　栖息地指数在金枪鱼类资源渔场中的应用 …… (187)
第一节　印度洋金枪鱼栖息地指数研究 …… (187)
第二节　南太平洋长鳍金枪鱼栖息地指数研究 …… (214)
第三节　中西太平洋鲣鱼栖息地指数研究 …… (258)
第四节　东太平洋黄鳍金枪鱼栖息地指数研究 …… (277)
第四章　栖息地指数在近海鲐鱼的应用 …… (288)
第一节　水温变动对东黄海鲐鱼栖息地的影响 …… (288)
第二节　多种数据源下鲐鱼栖息地模型及预测结果的比较 …… (297)
第三节　基于遥感水质的夏季东海鲐鱼渔情预报研究 …… (307)
第四节　基于多遥感因子的东海鲐鱼栖息地指数模型研究 …… (317)
第五节　利用栖息地指数预测近海鲐鱼热点区 …… (328)
参考文献 …… (346)
附录 …… (355)

第一章　栖息地理论和方法

第一节　基本概念与方法

一、基本概念

一般而言，栖息地是指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（全国科学技术名词审定委员会，2006），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。国际研究委员会（National Research Council，NRC，1982）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。美国地理调查局国家湿地研究中心鱼类与野生生物署（U. S. Fish and Wildlife Service）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（Brooks，1997）。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（Brooks，1997）。Morrison 等（1998）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，研究的主要内容是生物栖息环境的变化对生物活动的影响（王家樵，2006）。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（Le Pape et al.，2007），因此在渔业科学中，栖息地一般是指生物出现的物理化学环境及与之相关的其他生物。

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，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（朱宏达，2002）。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（U. S. Fish and Wildlife Service）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（U. S. Fish and Wildlife Service，1981），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（Rüger et al.，2005；Brambilla et al.，2009；Imam et al.，2009）。HSI模型自20世纪80年代早期以来被广泛地运用在渔业资源评估、保护及管理中，并已成为鉴定渔场及估算鱼类丰度的重要工具之一（Gore 和 Bryant，1990；Gillenwater et al.，2006；Van der Lee et al.，2006；Vinagre et al.，2006；Vincenzi et al.，2006；Gómez et al.，2007；Nishida et al.，2003）。近年来，HSI模型也被应用于海洋环境对鱼类分布、中心渔场预报等方面的研究与应用（Chen et al.，2010；陈新军等，2009；Lee et al.，2005；冯波，2007）。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。

栖息地是直接供物种、种群或群落生存、生长及繁殖的地理及生态环境（Brooks，1997；National Research Council，1982）。每一个物种都有其特定的栖息地需求。当栖息地质量下降或消失时，物种的数量将减少，甚至灭绝（Morrison et al.，1998）。在渔业资源研究中，很重要的一点就是对鱼类栖息地的鉴定，这集中在环境因子对物种或种群的分布及数量的影响上。HSI模型由一个或多个对物种或种群分布有显著影响的环境因子发展而成。捕捞努力量是鱼类出现或鱼类可获得性的一个指标，通常被用来建立鱼类栖息地模型，这一模型相比于基于CPUE（鱼类资源丰度指标）的栖息地模型能更好的定义最优栖息地（Tian et al.，2009）。

二、研究方法简述

在研究中，栖息地指数HSI取值范围一般为0.0~1.0，它是一个数量指数，0.0表示不适宜生境，1.0表示最适宜生境（U. S. Fish and Wildlife Service，1981）。HSI模型特别适于表达简单而又易于理解的主要环境因素对生物分布的适宜度或丰度（金龙如等，2008）。HSI与生境评价程序（Habitat evaluation procedures，HEP）一起被广泛地运用于野生生物的栖息地质量评估，在运用中它们是最有影响力的管理工具，这些评估结果应用在日常的自然资源管理与决策支持中（Brooks，1997）。

通常而言，HSI模型的开发过程包括：

（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，计算整体 HSI 值；

（5）产生适宜度地图（金龙如等，2008）。

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（王家樵，2006）。

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（郭爱和陈新军，2008；郭爱和陈新军，2009；Schaeffer et al.，2008）。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（Lee et al.，2005；易雨君等，2008；Thomasma et al.，1991）。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（2006）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或测量或取样。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（Vinagre et al.，2006）。

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生活史阶段对环境因子的选择不同。一般而言，海洋生物中，考虑的主要影响因子有温度，包括 SST、GSST、不同水深温度等以及海洋表面盐度，海洋表面高度距平、SSH 和叶绿素 a（Chl-a）等等（Vincenzi et al.，2006；冯波等，2010；Tian et al.，2009）；河口中，考虑的主要影响因子有温度、盐度、深度、溶解氧等等（Foreword，2006）；河流中，考虑的主要影响因子有温度、深度、水体流速等等；湖泊中，考虑的主要影响因子有深度、水体透明度、风区长度和水化学参数等等（易雨君等，2007；易雨君等，2008；班璇等，2009）。底栖生物还会考虑沉积物类型和底质等等（Cao et al.，2009；Chen et al.，2007；Gillenwater et al.，2006；Vinagre et al.，2006；Vincenzi et al.，2006）。这些环境因子资料的来源一般包括：①遥感环境数据；②实地测量数据；③实验数据；④间接获取（在前三个数据的基础上，通过数学模型或方法计算得到）。

HSI 模型的开发者通常假设：①物种或种群主动选择适宜其生存的生境；②物种和环境变量存在线性关系，这种线性关系主要来自经验数据、专家判断或二者结合（金龙如等，2008；Thomasma et al.，1991；Horne，1983）。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（表 1-1）。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 1-1 适宜性指数函数的构建及应用

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（*Ommastrephesbartramii*） 桑达斯基河瓦氏吸口鱼（Greater Redhorse） 无脊椎动物襀翅目（*Plecoptera*）、葡萄牙塔古斯河口鳎（*Soleasolea*and *Soleasenegalensis*） 桑达斯基河大眼梭鲈（*Sander vitreus*）	Chen 等、Tomsic 等、Vinagre 等、Gillenwater 等
	线性函数	印度洋大眼金枪鱼（*Thunnusobesus*） 长江中华鲟（*Acipensersinensis*） 长江中华鲟（*Acipensersinensis*） 布宜诺斯艾利斯牙银汉鱼（*Odontesthesbonariensis*） 龙须眼子菜（*Potamogetonpectinatus*） 美洲西鲱（*Alosasapidissima*） 欧鳟（*Salmotrutta*） 大马哈鱼（*Oncorhynchustschawytscha*） 条纹狼鲈（*Morone saxatilis*（Walbaum））	陈新军等、易雨君等、班璇等、Gómez 等、Lee 等、U.S Fish 和 Wildlife Service
数理统计知识	线性回归	印度洋大眼金枪鱼（*Thunnusobesus*）	王家樵等
	非线性回归	中西太平洋鳄鱼（*Katsywonuspelamis*） 地中海马尼拉蛤（*Tapes philippinarum*）	郭爱和陈新军、Vincezi 等
	正态分布模型	西北太平洋柔鱼（*Ommastrephesbartramii*）	陈新军等
	分位数回归	西南大西洋阿根廷滑柔鱼（*Illexargentinus*） 印度洋大眼金枪鱼（*Thunnusobesus*）	冯波等
	指数多项式模型	奥扎克山脉溪流小龙虾（*Orconectesneglectus*）	Gore 和 Bryant

一般而言，各因子的权重是通过专家知识获得的（Vinagre et al.，2006）。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

(Tian et al., 2009)。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，一些研究者认为，从专家判断获得的权数相比于目前算法的薄弱环节是强有力的，因为这些权数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（Vinagre et al., 2006）。

三、常用的 HSI 计算公式及其应用

目前在渔业科学中，常用的 HSI 综合算法有：

(1) 连乘法（continuedproduct model，CPM）（陈新军等，2008）

$$HSI = \prod_{i=1}^{n} SI_i \tag{1-1}$$

(2) 最小值法（minimum model，MINM）（班璇等，2009）

$$HSI = \mathrm{Min}(SI_1, SI_2, \cdots, SI_n) \tag{1-2}$$

(3) 最大值法（maximum model，MAXM）（王家樵等，2006）

$$HSI = \mathrm{Max}(SI_1, SI_2, \cdots, SI_n) \tag{1-3}$$

(4) 几何平均法（geometric mean model，GMM）（郭爱和陈新军，2009）

$$HSI = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{n} SI_i} \tag{1-4}$$

(5) 算术平均法（arithmetic mean model，AMM）（Tian et al., 2009）

$$HSI = \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{n} SI_i \tag{1-5}$$

(6) 混合算法（冯波等，2010）

根据小中求大原则，即在不同时间内取各因子 SI 的最小值，同一地点取各时间段的最大值，即：

$$HSI = \mathrm{Max}\{\mathrm{Min}(SI_1, SI_2, \cdots, SI_n)_1, \cdots, \mathrm{Min}(SI_1, SI_2, \cdots, SI_n)_j\} \tag{1-6}$$

(7) 赋予权重的几何平均值算法（weighted geometric mean，WGM）（Vincenzi et al., 2006）

$$HSI = \left(\prod_{i=1}^{n} SI_i^{w_i}\right)^{1/\sum_{i=1,\cdots,n} w_i} \tag{1-7}$$

(8) 赋予权重的算术平均值算法（weighted mean model，WMM）（Wakeley，1988）

$$HSI = \frac{1}{\sum_{i=1,\cdots,n} w_i}\sum_{i=1}^{n} w_i SI_i \tag{1-8}$$

上述式（1-1）~式（1-8）中，i 为第 i 个影响因子、n 为影响因子总数、SI_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。

基本的算法有前 5 种，陈新军等（2008）、郭爱和陈新军（2009）、Chen 等（2009，2010）分别就印度洋大眼金枪鱼、中西太平洋鲣鱼、西北太平洋柔鱼及东海鲐鱼进行了模型比较（表 1-2）。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（U. S. Fish and Wildlife Service，1985）。MINM 受最小 SI 因子的限制，因为 HSI 决定于各因子 SI 中的最小者，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（易雨君等，2007；易雨君等，2008）。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（Tian et al.，2009；Chen et al.，2009），但这两种算法也都存在各自的利弊（表 1-2），目前渔业科学中还没有明确的定义哪种算法较好，以后需进一步对其进行研究，但一般针对所获取的数据特点，结合各自算法的优缺点，或对这两种模型输出的进行比较，最后对其进行模型的取舍。Terrel（1984）建议通过几何平均算法建立的模型中参数越少越好。Layher 和 Maughan（1985）也指出这种方法并不能很好的模拟生物体与各环境因子之间的综合关系。

表 1-2 栖息地适宜性指数不同模型优缺点比较

模型	优点	缺点	应用
连乘法	估计结果保守	对零值敏感	无
最小值法	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	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	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	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（2006）、冯波等（2009）利用分位数回归（Quantiles regression，QR）法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，进一步求算出 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）（Rüger et al.，2005）、模糊神经网络（Fuzzy neural network model，FNN）（Fukuda et al.，2006）和二项逻辑斯蒂克模型（Fukuda et al.，2006）。

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 划分成不同的等级，并给生物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。

模型检验（Model testing）步骤一般包括模型校正（calibration）、验证（Verification）和实证（Validation）（Brooks，1997）。U. S. Fish and Wildlife Service 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 0.0~0.3），然而计算结果很有可能没有覆盖 0.0~1.0 的整个范围，在 Brooks（1997）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 之间，这在栖息地质量识别中是不被允许的，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。

Van der Lee 等（2006）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（Chen et al.，2009；Gillenwater et al.，2006；Vincenzi et al.，2006；Tian et al.，2009）。

HSI 模型并不具有普适性，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（Brooks，1997）。

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。但 Brooks（1997）认为，未经检验的 HSI 模型将在应用中可能做出巨大贡献，在决策制定时可能更受欢迎。

第二节 国内外研究现状

一、栖息地适宜性指数在内陆渔业中的应用

HSI 在内陆河流及湖泊渔业中应用较为广泛，主要用于水生生物的保护与管理。详细案例分析如下：U. S. Fish and Wildlife Service 对美洲西鲱（*Alosasapidissima*）、欧鳟（*Salmotrutta*）、大马哈鱼（*Oncorhynchustschawytscha*）和条纹狼鲈（*Moronesaxatilis*）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（一般为分线段函数），用 MINM 或 AMM 构建 HSI 模型，从而为渔业的可持续发展及有效管理提供了决策支持。Gore 和 Bryant 利用流速、深度和地表覆盖物研究了奥扎克（Ozark，美国密苏里州）山脉溪流中小龙虾（*Orconectesneglectus*）的适宜栖息地的时空变化，利用液压应力模型（Hydraulic stress models）计算黏性底层厚度，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）的流速、地表覆盖物及黏性底层厚度的 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 等利用 D、V 和 Sub 等因子研究了桑达斯基河大眼梭鲈的产卵栖息地适宜性，基于 Saskatcheman 渔业实验室的研究结果，赋予深度和流速的 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^3/s 时达到最大。Tomsic 等利用地表覆盖物、深度和流速研究了桑达斯基河（Sandusky River，美国俄亥俄州）瓦氏吸口鱼（*Greater*

Redhorse）和无脊椎动物襀翅目（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 等利用水体透明度、风区长度、磷酸盐浓度和深度对荷兰艾瑟尔湖龙须眼子菜的 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 等在前人研究的基础上，利用水化学参数、持续水温、孵化水温、溶解氧、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（*Odontesthesbonariensis*）的物理化学生境，其中水化学参数包括总溶解性固体和化学需氧量等 10 个因子，并用 AMM 建立水化学参数的 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。易雨君等对长江中华鲟（*Acipensersinensis*）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温度、深度、流速、退水率、含沙量、溶解氧和繁殖季节的食卵鱼数等。

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，通常被忽视的模型验证过程也得到了重视，并尽可能采用实测的资料密度数据对模型进行验证。

二、栖息地适宜性指数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，主要用于中心渔场分析、资源量估算及生态管理等。

Vincezi 等（2006）利用沉积物、溶解氧、温度、深度和 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（2006）利用深度、温度、盐度、底表沉积物、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的 HSI 模型能较好的模拟塞内加尔鳎的密度分布。Chen 等（2009）利用遥感 SST、海洋表面盐度、海洋表面高度距平值和 Chl-a 数据对东中国海鲐鱼（*Scomber japonicus*）进行了研究，用四种不同方法（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 模型能可靠预测鲐鱼栖息地。Chen 等（2010）利用遥感环境数据，包括 SST、海洋表面盐度、海洋表面高度距平值和 Chl-a 对西北太平洋柔鱼栖息地进行了研究，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 SST、海洋表面高度距平值和 Chl-a 三个环境因子的 AMM 模型能很好地预测柔鱼的适宜生境。陈新军等（2009）利用 SST 及 GSST 对该柔鱼栖息地进行了进一步研究，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 SST 和 GSST 的 AMM 的 HSI 模型能较好地预测西北太平洋柔鱼中心渔场。Tian 等（2009）以捕捞努力量和 CPUE 作为丰度指标，利用 SST、35 m水温、317 m 水温、海洋表面盐度、SSH 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，基于捕捞努力的 HSI 模型能更好地定义该柔鱼的最适栖息地。冯波等（2010）利用 5 m 水温、5 m 盐度、57 m 盐度、SSH、Chl-a 和表层盐差对西南大西洋阿根廷滑柔鱼栖息地进行了研究，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（2007）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（2008）利用 0~300 m 的加权平均水温、盐度、溶解氧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 值能较好地估计该鱼种的渔获地点和渔获频次。王家樵等（2006）利用温度、盐度、溶解氧和温跃层深度四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钓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（2009）利用 0~300 m 水层的加权平均水温、50~150 m 水层的温差和氧差三个环境变量，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钓获率的最佳上界 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（2009）利用水温垂直结构对中西太平洋鲣鱼（*Katsywonus pelamis*）栖息地进行了研究，首先采用一元非线性方程建立 SST、12.5 m 水温等 5 个水温因子与 SI 之间的关系，然后