



DOI: 10.5846/stxb201812252802

王耕, 关晓曦. 珊瑚礁生态系统模型研究现状及热点分析. 生态学报, 2020, 40(4): 1496-1503.

## 珊瑚礁生态系统模型研究现状及热点分析

王 耕\*, 关晓曦

辽宁师范大学城市与环境学院, 大连 110629

**摘要:**以 Web of Science 数据库中的 Web of Science<sup>TM</sup> 核心合集和中国期刊全文数据库为数据源, 对 2018 年 10 月前国内外发表的珊瑚礁生态系统模型研究相关文献进行计量分析, 评估该领域的研究现状及热点。研究表明: 国外珊瑚礁生态系统模型研究起始于 1974 年, 相关文献的发文量整体呈大幅度增长趋势; 国内研究于 1997 年起步, 发文量增长较缓慢, 近三年显著增加。高频关键词统计分析可以看出, 国外对于珊瑚礁中生活的各种生物及其生态分布研究较为广泛, 生态系统的生物群落多样性是该领域的研究热点, 关于珊瑚礁生态系统风险、威胁、胁迫和修复的模型研究近几年有所起色, 在今后一段时间内将是该领域的主要研究趋势。国内相关研究局限于珊瑚礁地质环境与波浪传播等方面, 应在扩大研究范围的同时, 将重点放在珊瑚礁生态系统退化诊断与修复的探究上。

**关键词:** 文献计量; 珊瑚礁生态系统; 模型; 热点

珊瑚礁是由珊瑚生物群落(珊瑚虫)聚集的石灰石保护结构形成的, 这些生活在热带水域的群体作为一个统一的有机体, 通常接近地表并生长了成百上千年。珊瑚礁生态系统是生物多样性和生态价值最高的海洋生态系统之一, 它古老、珍贵又多姿多彩, 常被誉为“海洋中的热带雨林”或“海上长城”<sup>[1-2]</sup>。在近几十年里, 由于全球气候变化, 海洋酸化和人类的不合理活动<sup>[3]</sup>, 世界上许多地方珊瑚礁的退化速度远超其生长速度, 并呈加速退化的趋势发展<sup>[4]</sup>。如我国南海的珊瑚礁面积约有 37200 km<sup>2</sup>, 占世界珊瑚礁面积的 5%, 居东南亚地区第二位<sup>[5-9]</sup>, 但南海珊瑚礁生物资源呈现出十分严重的衰退趋势, 珊瑚礁损害率甚至高达 90% 以上<sup>[10]</sup>。南海诸岛珊瑚礁不仅具有渔业、旅游业和海岸保护等价值和服务, 还因其得天独厚的地理位置而对领土、领海和海洋专属经济区的划分起着无可替代的作用<sup>[11]</sup>, 于是保护和修复珊瑚礁生态系统无疑成为当今国际生态保护的研究热点。

为探求珊瑚礁生态系统各部分的运行机制和相互作用, 借助模型手段进行研究的方法颇为盛行。珊瑚礁生态系统模型研究是根据生态系统内生物及其周围环境的特性, 通过计算机等手段构建出模型, 对珊瑚礁、珊瑚礁生物种群群落及生存环境进行追踪和检测, 一定程度上有助于了解和掌握系统动态, 可为保护和修复珊瑚礁生态系统提供可行的理论与实践指导。国际上对珊瑚礁生态系统建模研究起始于 20 世纪 70 年代, 随着珊瑚礁退化造成的负面影响日益显著, 系统建模研究发展迅速。Macintyre 等<sup>[12]</sup>为激发对珊瑚礁地质调查中进行模拟的有效性讨论, 于 1974 年首次采用图形模型描绘了珊瑚礁生态系统中碳流动模式的位置和特征, 为未来珊瑚礁生态系统的模拟分析研究奠定了基础。Lidz 等<sup>[13]</sup>构建了迎风边缘模型, 为海平面波动期间碳酸盐岩台地的进积提供了一个重要而独特的运行机制, 为背礁露台盆地的填充做出重要贡献。van der Laan 和 Bradbury<sup>[14]</sup>使用一个简单的人工渔礁系统, 通过元胞自动机实现了模拟荆棘冠海星对珊瑚产生破坏的现象,

**基金项目:** 教育部人文社会科学重点研究基地重大项目 (18JJD790005); 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) (XDA13020401)

**收稿日期:** 2018-12-25; **网络出版日期:** 2019-11-20

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wanggeng@lnnu.edu.cn

成功研究了二者捕食与幼虫扩散和生存的影响关系。在珊瑚礁礁体建模研究的基础上,近些年来珊瑚礁生物如珊瑚共生体、珊瑚虫、珊瑚鱼等珊瑚物种的模型日益增多,Mcclanahan<sup>[15]</sup>、Jokiel, Martinelli<sup>[16]</sup>、Andres 和 Rodenhouse<sup>[17]</sup>等国际学者分别对珊瑚生物的物种分布、种间关系、种群大小及生长速度等进行监测和评估,旨在保护和提高珊瑚礁生态系统的生物多样性。国内珊瑚礁生态系统建模研究起步较晚,珊瑚礁礁体与波浪变形传播<sup>[18-21]</sup>等方面深受学者关注,投入使用的数理模型相对较多。

在珊瑚礁礁体模型、种群模型和生态系统模型研究中,各种建模方法与技术复杂多样,模型模拟结果差异较大,为了能够准确把握珊瑚礁生态系统模型研究的趋势,更好地解决珊瑚礁生态系统退化诊断的建模工作,有必要对当前有关珊瑚礁模型进行归纳分析。文献计量是一种基于数理统计的定量分析方法,是以科学文献的外在特征和数量为研究对象,采用数学与统计学方法来研究文献的分布结构、数量关系和变化规律等,用以描述、评价和预测科学技术的现状与发展趋势<sup>[22-23]</sup>。为了解各学科的研究状况、热点及趋势,文献计量方法已被多学科广泛应用<sup>[24]</sup>。因此本文借助文献计量方法为辅助手段,着重对当前国内外用以探究珊瑚礁生态系统的多种模型研究进行定量的统计分析,旨在了解掌握目前珊瑚礁生态系统模型研究的热点及发展趋势,为国内珊瑚礁生态修复的后续发展提供文献参考。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 数据来源

本文以 Web of Science 数据库中的 Web of Science<sup>TM</sup>核心合集为国外文献数据源,通过数据库检索相关文献。检索方式为“主题检索”,检索式为“coral reef” and “model”,文献类型为“article”,搜索年份截止在 2018 年 10 月(包括 10 月),共得到 4057 条符合条件的结果。将结果按照相关性进行排序,选取前 2000 个结果作为数据进行热点统计分析。

相比起国外较为丰富的研究现状,国内对于珊瑚礁生态系统模型构建的研究尚在萌芽之中。在中国期刊全文数据库(CNKI)中,选择主题为“珊瑚礁”并且“模型”的期刊文献,搜索年限为至今,仅得到 34 篇相关文献。

### 1.2 研究方法

本文借助文献计量为数理统计手段,对国内外珊瑚礁生态系统模型研究的现状以及热点态势进行分析,并进行可视化处理。利用 Bibexcel 软件不仅可以完成多种计量分析工作且便于与其他分析软件进行数据交换的特点,将关键词的词频进行统计并生成相关矩阵。具体方法为:将国外文献按照相关性排序后选取前 2000 篇以及国内 34 篇题录分别导入 Bibexcel 软件中,导出文献的高频关键词。国外研究去除最高频次并筛选出词频大于 13 的关键词共计 57 个,合并其中的同、近义词,如:“biodiversity”、“diversity”都是多样性的意思,故统一用“biodiversity”来表示,合并后共计 43 个高频关键词。国内研究则选取了 9 个频次大于等于 2 的关键词,利用 Bibexcel 软件将关键词进行两两配对。统计 2000 篇国际文献里高频关键词的共现频次形成 43×43 的共词矩阵,随后将矩阵导入到 Ucinet 中生成 .h 文件,再用 Netdraw 做出国际珊瑚礁生态系统模型研究高频关键词共现网络可视图。按照关键词的基本属性对关键词进行聚类分析,得出系统聚类分析表。

## 2 结果分析

### 2.1 发文量及各阶段内容分析

以 Web of Science 数据库检索的期刊文献数量作为国外数据来源,日期截止到 2018 年 10 月,共得到 4057 条结果;在 CNKI 中检索到 34 篇国内与珊瑚礁生态系统模型研究有关的文献,综合得到国际年度发文量如图 1 所示。

#### 2.1.1 发文量分析

由图 1 可以看出,就国外发文量而言,尽管个别年份发文数量有些许下降,但文献数量总体上呈大幅度增

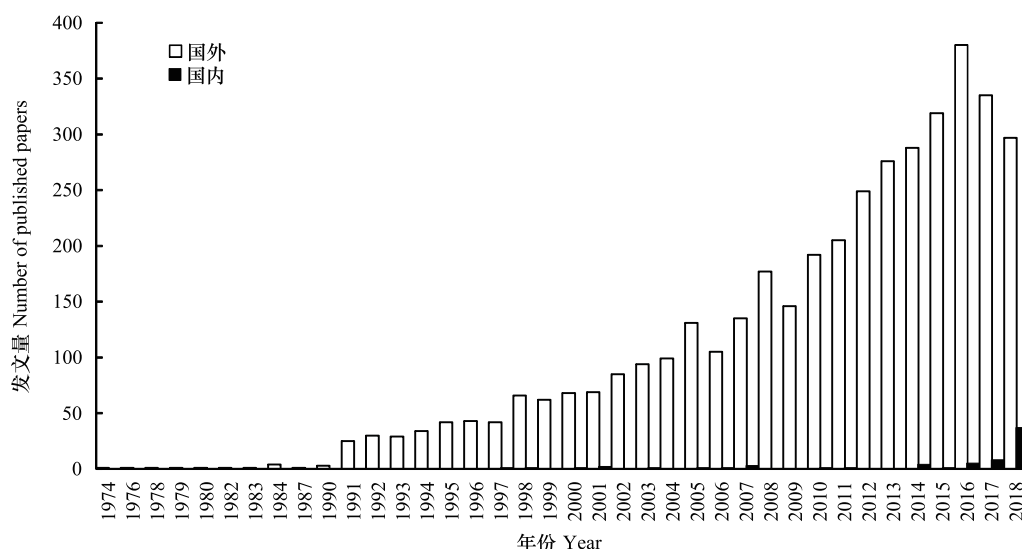


图1 国际珊瑚礁生态系统模型研究发文章量分布图

Fig.1 Number of articles about international coral reef ecosystem model

长的趋势,研究具体可分为五个阶段。第一阶段(1974—1990)萌芽阶段:1974年起,美国学者发布了首篇利用概念模型模拟珊瑚礁地质环境的文章,开辟了借助模型探究珊瑚礁生态系统的先河,随后陆续有学者加入模型研究行列,由于模型研究正处于探索阶段,发文章量稀少。第二阶段(1991—1997)缓慢发展阶段:随着珊瑚礁模型研究的不断深入探索,相关研究的发文章量较前一阶段有明显增多,但增长速率较低,且呈现出停滞状态。发文章量最多的是美国,发文章量 64 篇,其次是澳大利亚、加拿大,发文章量分别为 39 篇和 15 篇。第三阶段(1998—2005)稳定发展阶段:随着国际社会对珊瑚礁生态系统的聚焦,有关珊瑚礁生态系统珊瑚共生体及生境模拟模型研究明显增多,其中发文章量较多的国家有美国、澳大利亚和法国。第四阶段(2006—2016)波动增长阶段:由于珊瑚白化退化现象日益严重,珊瑚礁生态系统的退化引起了各国学者的强烈关注,大量相关模型研究涌现,其中美国的发文章量仍处于领先地位,十年间发文章量已高达 1211 篇占国际总发文章量的 44%,其次是英国和澳大利亚。第五阶段(2016 年至今)加速增长阶段:2016 年至今虽发文章量有下降形势,但珊瑚礁生态系统的保护和修复已成为全球瞩目的研究领域,备受各国重视,致使各国发文章量普遍大幅度提高,该领域的研究进入了加速发展阶段。发文章量超过 100 的国家有四个,依次是美国、澳大利亚、英国和法国,美国在加勒比海地区珊瑚礁的研究成果始终遥遥领先。

经过图 1 对比可以明显看出,我国在这方面起步较晚,对于珊瑚礁生态系统模型的研究相对匮乏。1997 年才发表第一篇文章,同时相关研究的发展不稳定。虽然我国致力于珊瑚礁生态系统的修复工作已持续十余年,但针对构建模型进行生态系统研究的内容仍然匮乏,直到 2016 年以后,随着科技的发展时代的进步,研究手段和技术都有了很大提高,发文章量才有所上升,但仍远远少于国际发文章量。2018 年我国的发文章量达到了最高值,共有 9 篇文献,占国内相关研究总发文章量的 26.4%。

### 2.1.2 研究内容分析

总体上看,国外用于研究珊瑚礁生态系统的模型范围广、用途多,该领域研究内容丰富,囊括了珊瑚-珊瑚共生体-生物种群-群落等模型的构建,用以对珊瑚礁生态系统组成部分进行模拟、监测、追踪、评估和预测,各阶段致力研究内容有所不同。萌芽阶段学者主要致力于对珊瑚礁成礁环境的探索,通过建模对珊瑚礁地质地貌性质、成礁环境进行模拟和研究。缓慢增长阶段在前人研究的基础上,加大了珊瑚礁成礁环境的探究力度,模型构建手段日益成熟,同时珊瑚礁生物群落的组成、生态分布、生物生产力和营养结构等研究增多,运用数学模拟等手段对群落的形成、演化和动力过程、变化趋势进行研究成为该领域的主要研究方向。稳定发展

阶段该领域有了新的关注点,此时珊瑚退化现象逐渐涌现,各国纷纷投入到珊瑚退化的研究中。失去共生藻的珊瑚因缺失营养物质和新陈代谢的能力大范围白化、退化,为达到通过保护和繁殖共生藻缓解珊瑚白化现象的目的,模拟藻类生存环境的仿真模型骤增,用于追踪和监测珊瑚共生藻的模型层出不穷。珊瑚礁生态系统的剧烈恶化使得保护和修复珊瑚礁生态系统成为学者热议话题。由于珊瑚礁生态系统是高度复杂的系统,其特征不在于生物和非生物成分之间的非线性关系,研究人员将研究重点转移到珊瑚礁生物和非生物成分的保护上。珊瑚、珊瑚共生体、珊瑚礁鱼类、底栖环境等模型模拟研究成果丰硕,珊瑚礁的生物群落物种复杂度及生物多样性的研究成为该领域的新焦点。由于世界各地的珊瑚礁都承受着由异常的温水事件带来巨大压力,导致大规模珊瑚褪色和大范围的珊瑚礁破坏,所以近阶段以来,全球气候变化、海水温度变化对珊瑚礁生态系统的影响机制研究明显增多,用于预测和判断未来气候变化会给珊瑚礁生态系统带来的胁迫和风险的模型逐渐增多,珊瑚礁生态系统风险、威胁、胁迫和修复的研究成为该领域的主要发展趋势。

## 2.2 高频关键词分析

关键词是对文章的高度概括和精炼,将筛选出的国际 2000 篇和国内 34 篇相关文献利用 Bibexcel 软件导出高频关键词,由于关键词较多,为保证研究的共性,国外分析选择出词频大于 13 的关键词共计 57 个,合并其中的同、近义词,得到共计 43 个高频关键词,国内分析则选取频次大于 2 的共计 9 个。这些高频关键词在一定程度上分别反映了国内外珊瑚礁生态系统仿真模拟研究的核心和热点。利用 Bibexcel 将从 Web of Science 数据库中提取高频关键词结果如表 1 所示。

表 1 国外高频关键词及词频

Table 1 High frequency keywords and their frequencies in foreign

| 频次<br>Frequency | 关键词<br>Key words       | 频次<br>Frequency | 关键词<br>Key words    | 频次<br>Frequency | 关键词<br>Key words |
|-----------------|------------------------|-----------------|---------------------|-----------------|------------------|
| 393             | Coral reef             | 32              | Symbiodinium        | 16              | Hydrodynamics    |
| 96              | Climate change         | 30              | Caribbean           | 16              | Biogeography     |
| 92              | Coral bleaching        | 29              | Herbivory           | 15              | Global warming   |
| 86              | Coral reef fish        | 27              | Calcification       | 14              | Turbidity        |
| 83              | Great Barrier Reef     | 27              | Disturbance         | 14              | Competition      |
| 62              | Biodiversity           | 24              | Scleractinia        | 14              | Water quality    |
| 44              | Connectivity           | 23              | Macroalgae          | 14              | Turbidity        |
| 44              | Marine protected areas | 21              | Red Sea             | 13              | Hawaii           |
| 41              | Ocean acidification    | 20              | Conservation        | 13              | Adaptation       |
| 41              | Larval dispersal       | 20              | Predation           | 13              | Coral Disease    |
| 40              | Seasurface temperature | 19              | Species richness    | 13              | Habitat          |
| 39              | Resilience             | 19              | Fringing reef       | 13              | Evolution        |
| 38              | Remote sensing         | 17              | Holocene            | 13              | Fisheries        |
| 33              | Recruitment            | 17              | Population dynamics |                 |                  |
| 33              | Symbiosis              | 16              | Acropora            |                 |                  |

根据表 1 可以看出:国外关于“珊瑚礁生态模型”研究的文献中,出现最多的关键词为 Coral reef(珊瑚礁),此外 climate change(气候变化)、Coral bleaching(珊瑚白化)、Coral reef fish(珊瑚礁鱼类)、Great Barrier Reef(大堡礁)和 biodiversity(生物多样性)五个关键词出现频率较大,频次均超过 50 占总统计高频词的 25.2%,说明国外对于珊瑚礁生态系统建立的模型主要集中于珊瑚白化以及生态系统的物种多样性上。气候变化是珊瑚白化的原因之一,海水升温会使珊瑚虫释放其体内的虫黄藻。虫黄藻既为珊瑚提供营养,又给珊瑚带来色彩,因此虫黄藻被释放后珊瑚就会出现不同程度的“白化”<sup>[25-26]</sup>。丰富的珊瑚礁资源为珊瑚礁鱼类提供了栖息及繁育场所,但珊瑚白化对珊瑚礁鱼类的生境造成改变,为珊瑚礁生态系统的生物多样性带来不容小觑的影响。因出现频次介于 50 和 20(包括 20)之间的关键词共 19 个,占总统计高频词的 36.3%。根

据 Connectivity(连通性)、ocean acidification(海洋酸化)、resilience(弹性)、calcification(钙化)等关键词可以看出研究人员对于珊瑚礁礁体的结构和组成投入了大量研究,甚至构建人工礁,以期通过建立一个稳定、抵抗风浪、提供庇护所的岩体结构,促使珊瑚快速安全的附着、生长和繁殖<sup>[27-28]</sup>。频次低于 20 但大于 13 的关键词共有 268 个,占全部的 16.1%。随着珊瑚礁生态系统修复研究的不断深入,Hydrodynamics(流体力学,水动力学)、Water quality(水质)、Fisheries(捕鱼业)、Coral Disease(珊瑚疾病)的研究不断增多,说明用以探究珊瑚礁生物生境特性如营养物质、生存动力的模型愈加丰富,珊瑚礁生态系统修复研究范围日益广泛。

利用 Bibexcel 将从 CNKI 中提取出高频关键词可知,除最高频率的珊瑚礁以外,其他关键词出现了 2 次分别为:数学模型、南海、承载力、钙质土、波浪破碎、波浪增水、波浪传播和波浪传播变形。从高频词统计词可以看出国内珊瑚礁模型研究与珊瑚礁成礁环境和水文动力学相关。

### 2.3 高频关键词的可视化分析

共词分析法是通过将某一学科领域的研究文献中的关键词共同出现在一篇文献中的现象进行分析,从而判断该领域主题之间相互关系的研究方法<sup>[29]</sup>。利用 Bibexcel 软件将国际上的 43 个关键词及词频进行两两配对,形成 43×43 的共词矩阵,随后将矩阵导入到 Ucinet 中生成 .h 文件,再用 Netdraw 做出国际珊瑚礁生态系统模型研究的高频关键词共现网络可视图,如图 2 所示完成共词分析。网络图中,节点大小表示关键词的中心度,节点越大中心度越高,说明该关键词与其他词共现的次数越多;节点间的连线表示两组关键词的关系,线条越粗表示关系越密切,两组共现次数越多<sup>[30-31]</sup>。

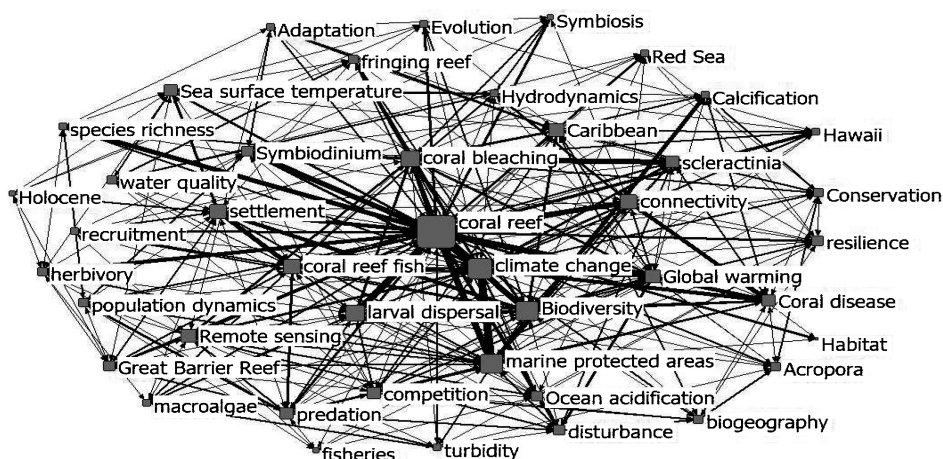


图 2 国外珊瑚礁生态系统模型研究高频关键词共现网络可视图

Fig.2 Co-occurrence network of high frequency key words from coral reef ecosystem model research in foreign

如图 2 所示,与 coral reef(珊瑚礁)共线次数较多的有 climate change(气候变化)、coral bleaching(珊瑚白化)、biodiversity(生物多样性)等词,说明这些研究方向是珊瑚礁生态系统模型研究的热门方向。气候变化对珊瑚礁生态系统的环境质量和内部生物生境产生直接影响,造成珊瑚退化,从而严重威胁珊瑚礁生态系统生物种群的生存和繁殖,大幅度降低了生态系统内物种丰富度,因此生态系统内生物多样性的追踪调查研究是当前研究领域的热点。其他关键词也由连线相互牵引形成了联系紧密、纵横交错的网状关系图。

国内研究因数量较少,研究方向相对较分散,并未出现共词现象。

### 2.4 高频关键词聚类分析

聚类分析法是一种以“物以类聚”为基本原理的多元统计方法。此方法能将大量数据按各自的特性来进行合理的分类,将不同特性的数据分类到不同的类或者簇,所以聚类分析后的同一个簇中的对象有很大的相似性,而不同簇间的对象有很大的相异性<sup>[32]</sup>。对国外文献中提取的 43 个高频关键词进行聚类分析,按照关键词的不同属性共得到四个群集如表 2 所示。

表 2 国外珊瑚礁模型关键词聚类群体划分

Table 2 Cluster groups of coral reef models key words in foreign

| 群集 Clusters    | 关键词 Key words                                                                                                                                                                                                                         |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 群集 1 Cluster 1 | Coral reef fish, larval dispersal, Symbiodinium, Population dynamics, scleractinia, Fringing reef<br>Coral reef, Herbivory, Macroalgae, Acropora, Biogeography, Biodiversity, Species richness, Calcification, Fisheries, Recruitment |
| 群集 2 Cluster 2 | Connectivity, Hydrodynamics, Habitat, Coral Disease, resilience, Water quality, evolution, predation, settlement, turbidity,<br>Symbiosis, adaptation, conservation, disturbance, Remote sensing, Coral bleaching, competition.       |
| 群集 3 Cluster 3 | Great Barrier Reef, marine protected areas, Caribbean, Red Sea, Hawaii                                                                                                                                                                |
| 群集 4 Cluster 4 | ocean acidification, climate change, global warming, Holocene, Sea surface temperature                                                                                                                                                |

从表 2 可以看出,聚类分析后可以将高频关键词分为 4 个群集。群集 1 主要囊括了珊瑚礁生态系统中生活的各种生物因子和系统内各物种相互作用的种间关系,如 Acropora(鹿角珊瑚)、macroalgae(大型藻类)、Symbiodinium(共生藻)、Coral reef fish(珊瑚礁鱼)、competition(竞争)、Symbiosis(互利共生)等。珊瑚礁生物群落的种类组成丰富多彩,是构成珊瑚礁生态系统的主体,生物群落多样性很大程度上反映了生态系统的多样性。珊瑚礁上的生物分布具有明显的地方性,生物间的生存竞争可以有效限制种群的扩散。群集 2 包括了珊瑚礁生态系统生物的生存环境因子以及环境变化引发的珊瑚疾病等研究,如 water quality(水质)、Habitat(生境)、resilience(水质)、Connectivity(连通性)和 Coral bleaching(珊瑚白化)等。随珊瑚退化的日益加重,为关注和保护珊瑚礁生态系统,对珊瑚及生物的生活条件监测和模拟的模型研究日益受学者关注。群集 3 主要是针对特定区域如各地的海洋保护区的研究,像 Hawaii(夏威夷)、Red Sea(红海)、Great Barrier Reef(大堡礁)等。群集 4 是针对于气候变化对珊瑚礁影响的研究,如 global warming(全球变暖)、Sea surface temperature(海平面温度)等,近些年来全球气候变化及一系列极端天气引发的珊瑚礁生态系统的破坏和损害引发学者高度重视,海水的升温和降温,海平面的升降变化等都会对生存于浅海的珊瑚礁产生巨大的负面影响。利用模型评估和预测气候变化对珊瑚礁生态系统的影响可以有效应对未来可能发生的损坏,以便提出有效的防范和修复措施。

国内研究较少,不便于聚类分析。但从承载力、钙质土表示国内对珊瑚礁成礁环境方面有所涉及;从波浪破碎、波浪增水、波浪传播和波浪传播变形说明国内对于珊瑚礁水文动力学研究较为关注。

### 3 结论与讨论

通过对珊瑚礁生态系统建模研究相关文献的统计与分析,并对结果进行总结归纳,得到如下结论:

按照时间顺序对发文量进行分析,可将国外针对该学科的探究分为五个阶段:萌芽阶段,缓慢发展阶段,稳定发展阶段、波动增长阶段和加速增长阶段。各阶段涉及到的研究重点和热点有所不同,但珊瑚礁成礁环境生态系统的生物多样性建模研究持续是热点。美国在该领域的研究始终处于遥遥领先的地位,其次是澳大利亚、加拿大等拥有富饶珊瑚礁资源的国家。国内研究起步较晚,发文量也相对匮乏,构建的模型主要涉及珊瑚礁的礁体地形和波浪变形传播方面。国外在 1974—2018 共 45 年间发表了 4057 篇文献,国内则在 1997—2018 共 22 年间发表了 34 篇文献,可见国外发文量的增长幅度约是国内发文量的 90 倍,因此国内应大力加强构建珊瑚礁生态系统模型的研究力度。

从高频关键词统计分析来看,除 Coral reef(珊瑚礁)外,climate change(气候变化)、Coral bleaching(珊瑚白化)、Coral reef fish(珊瑚礁鱼类)、Great Barrier Reef(大堡礁)和 biodiversity(生物多样性)出现次数较多。国内文献中除珊瑚礁外,波浪破碎、波浪增水、波浪传播和波浪传播变形等频率相对较高。透过这些高频关键词,可以看出国内外用于研究珊瑚礁生态系统的模型各有侧重:国外主要致力于调查珊瑚礁退化原因及监测生态系统生物多样性的研究上,而国内则将重点放在珊瑚礁成礁环境与波浪传播方面。

从高频关键词共现网络可视图可以看出:国际研究中 climate change(气候变化)、biodiversity(生物多样性)、coral bleaching(珊瑚白化)等是珊瑚礁生态系统模型研究的核心与热点。而国内由于起步晚研究少,高

频关键词较为分散,无共词现象。

从高频关键词聚类分析结果来看:国外的模型研究主要分为四个方面,一是针对生态系统内生物种群及多样性的模拟研究;二是对于珊瑚礁生物生境质量和珊瑚疾病的调查研究;三是对于海洋保护区等特定区域的监测研究;四是针对气候变化给珊瑚礁生态系统带来影响的评估和预测研究。

综上所述,当前全世界珊瑚退化、珊瑚礁生态环境恶化形势逼人,珊瑚礁生态系统亟待修复。采用建模手段研究珊瑚礁生态系统可有效为保护和修复生态提供科学的理论和技术指导。珊瑚礁生态系统建模研究成果丰富,当前国内外对于此研究的进展差别较大。国外通过计算机建模<sup>[33]</sup>、动力学模拟<sup>[34]</sup>、高光谱遥感和辐射传输建模<sup>[35]</sup>、数学模型<sup>[36-37]</sup>、基于模糊逻辑<sup>[33]</sup>的珊瑚礁建模等技术手段,对珊瑚礁生态系统各组成部分进行模拟、评估和修复等工作。国外的模型研究内容较全面,如模拟珊瑚礁礁盘结构、监测珊瑚生物种群、修复珊瑚礁底栖环境等,珊瑚礁生态系统的生物多样性研究持续是该领域的核心和热点,同时用于预测珊瑚礁生态系统的风险、胁迫和修复的模型研究也在逐渐增多。而国内用建模方法研究珊瑚礁生态系统的研究进展较为落后,常用的建模方法是构建数理模型,主要用于对珊瑚礁礁体与波浪传播变形方面的数值模拟研究。相比之下,我国在该领域的研究尚显薄弱,还处于初步探索阶段,所以我国应不仅局限于当前研究方向,还应将重点尽快转到对珊瑚礁生态系统风险、威胁、胁迫和修复的评估和预测上,相信今后我国珊瑚礁的生态修复工作会取得更加长远的成绩。

#### 参考文献 (References):

- [1] 鲍鹰,周学家,黄美霞,梁凯珊,黄雪芬,黄少秋,邱庆昌,郑小欧. 构建人工珊瑚礁的初步研究. 海洋与渔业, 2012, (5): 50-52.
- [2] 吴立金. 海南珊瑚礁贸易调查. 环境, 2007, (12): 22-27.
- [3] 郑梅迪,曹龙. 全球海洋酸化及浅水和冷水珊瑚礁化学生存环境的模拟研究. 气候变化研究进展, 2015, 11(3): 185-194.
- [4] 廖芝衡,余克服,王英辉. 大型海藻在珊瑚礁退化过程中的作用. 生态学报, 2016, 36(21): 6687-6695.
- [5] 赵焕庭,张乔民,宋朝景. 华南海岸和南海诸岛地貌与环境. 北京: 科学出版社, 1999.
- [6] 邹发生. 海南岛湿地. 广州: 广东科技出版社, 2005.
- [7] Wang P X, Li Q Y. The South China Sea: Paleocceanography and Sedimentology. New York: Springer, 2009.
- [8] 赵焕庭,王丽荣,宋朝景,陈北跑. 广东徐闻西岸珊瑚礁. 广州: 广东科技出版社, 2009.
- [9] 张乔民. 热带生物海岸对全球变化的响应. 第四纪研究, 2007, 27(5): 834-844.
- [10] 傅秀梅,邵长伦,王长云,韩磊,李国强,刘光兴,管华诗. 中国珊瑚礁资源状况及其药用研究调查 II. 资源衰退状况、保护与管理. 中国海洋大学学报, 2009, 39(4): 685-690.
- [11] 赵焕庭,王丽荣,袁家义. 南海诸岛珊瑚礁可持续发展. 热带地理, 2016, 36(1): 55-65.
- [12] Macintyre I G, Smith S V, Zieman J C. Carbon flux through a coral-reef ecosystem: a conceptual model. The Journal of Geology, 1974, 82(2): 161-171.
- [13] Lidz B H, Hine A C, Shinn E A, Kindinger J L. Multiple outer-reef tracts along the south Florida bank margin: outlier reefs, a new windward-margin model. Geology, 1991, 19(2): 115-118.
- [14] van der Laan J D, Bradbury R H. Futures for the great barrier reef ecosystem. Mathematical and Computer Modelling, 1990, 14: 705-709.
- [15] McClanahan T R. Resource utilization, competition, and predation: a model and example from coral reef grazers. Ecological Modelling, 1992, 61(3/4): 195-215.
- [16] Jokiel P, Martinelli F J. The vortex model of coral reef biogeography. Journal of Biogeography, 1992, 19(4): 449-458.
- [17] Andres N G, Rodenhouse N L. Resilience of corals to hurricanes: a simulation model. Coral Reefs, 1993, 12(3/4): 167-175.
- [18] 张其一,史宏达,高伟,李金峰. 珊瑚礁地形上波浪传播变形的非静压数值模拟. 海岸工程, 2017, 36(4): 1-9.
- [19] 陈洪洲,毕春伟,高俊亮. 波浪在珊瑚岸礁礁坪上传播变形的数值研究. 水科学进展, 2018, 29(2): 252-259.
- [20] 赵焕庭,王丽荣,宋朝景. 南海珊瑚礁地貌模型研究. 海洋学报, 2014, 36(9): 112-120.
- [21] 姚宇,杜睿超,蒋昌波,袁万成,唐政江. 礁冠宽度对珊瑚礁坪波浪增水影响的实验研究. 海洋通报, 2017, 36(3): 340-347.
- [22] Pandey R P, Pandey A, Galkate R V, Byun H R, Mal B C. Integrating hydro-meteorological and physiographic factors for assessment of vulnerability to drought. Water Resources Management, 2010, 24(15): 4199-4217.
- [23] Nederhof A J. Bibliometric monitoring of research performance in the Social Sciences and the Humanities: a review. Scientometrics, 2006, 66(1): 81-100.

- [24] Gertsch N, Kongthon A, Puengrums S. Profiling the research landscape in emerging areas using bibliometrics and text mining: a case study of biomedical engineering (BME) in Thailand. *International Journal of Innovation and Technology Management*, 2017, 14(2): 1740011.
- [25] Gates R D. Seawater temperature and sublethal coral bleaching in Jamaica. *Coral Reefs*, 1990, 8(4): 193-197.
- [26] 李元超, 黄晖, 董志军, 练健生, 周国伟. 珊瑚礁生态修复研究进展. *生态学报*, 2007, 28(10): 5047-5054.
- [27] Forsman Z H, Rinkevich B, Hunter C L. Investigating fragment size for culturing reef-building corals (*Porites lobata* and *P. compressa*) in *ex situ* nurseries. *Aquaculture*, 2006, 261(1): 89-97.
- [28] 覃祯俊, 余克服, 王英辉. 珊瑚礁生态修复的理论与实践. *热带地理*, 2016, 36(1): 80-86.
- [29] 陈枫楠, 沈镭. 基于共词分析方法的“能量流动”国内外研究述评. *资源科学*, 2014, 36(12): 2517-2528.
- [30] 曹永强, 郭明, 刘思然, 杨俊. 基于文献计量分析的生态修复现状研究. *生态学报*, 2016, 36(8): 2442-2450.
- [31] 钟伟金, 李佳, 杨兴菊. 共词分析法研究(三)——共词聚类分析法的原理与特点. *情报杂志*, 2008, 27(7): 118-120.
- [32] 赵永虹. 特征模型的形状识别及聚类算法分析. *信息与电脑*, 2013, (9): 22-23.
- [33] Meesters E H, Bak R P M, Westmacott S, Ridgley M, Dollar S. A fuzzy logic model to predict coral reef development under nutrient and sediment stress. *Conservation Biology*, 1998, 12(5): 957-965.
- [34] Melbourne-Thomas J, Johnson C R, Fung T, Seymour R M, Chérubin L M, Arias-González J E, Fulton E A. Regional-scale scenario modeling for coral reefs: a decision support tool to inform management of a complex system. *Ecological Applications*, 2011, 21(4): 1380-1398.
- [35] Goodman J A. Hyperspectral Remote Sensing of Coral Reefs: Deriving Bathymetry, Aquatic Optical Properties and a Benthic Spectral Unmixing Classification using AVIRIS Data in the Hawaiian Islands[D]. Davis, CA: University of California, Davis, 2004.
- [36] Li X, Wang H, Zhang Z, Hastings A. Mathematical analysis of coral reef models. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 2014, 416(1): 352-373.
- [37] Spillman C M, Alves O. Dynamical seasonal prediction of summer sea surface temperatures in the Great Barrier Reef. *Coral Reefs*, 2009, 28(1): 197-206.