

## ◆研究态势分析◆

# 国际人工鱼礁研究现状与态势分析<sup>\*</sup>

张灿影<sup>1</sup>,孙景春<sup>1</sup>,鲁景亮<sup>2</sup>,冯志纲<sup>1\*\*</sup>

(1. 中国科学院海洋研究所,山东青岛 266071;2. 中国科学院兰州文献情报中心,甘肃兰州 730000)

**摘要:**人工鱼礁(Artificial reefs, ARs)是一种有效的鱼类诱集设施和重要的渔业管理工具。本研究以科学引文索引(Science Citation Index Expanded, SCIE)数据库为基础,利用文献计量方法,对国际人工鱼礁研究文献的年代、主要作者关键词、研究内容以及发文国家主要建设情况等进行全面分析。分析结果表明,国际人工鱼礁研究年均产出论文数量不多,美国是人工鱼礁研究发文数量最多的国家。国际研究主题主要包括人工鱼礁区生物群落结构与环境因子的相关性研究、人工鱼礁生物诱集效果研究、工程学研究以及社会、经济效益研究,且各国研究各有侧重、各具特色,研究内容因建设目标而异。该研究结果可为我国人工鱼礁研究和建设提供参考依据。

**关键词:**人工鱼礁 SCIE 发展态势 研究热点 建设

中图分类号:S931.9 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2021)01-0001-10

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20210309.010

## 0 引言

近年来,过度捕捞和大规模海上工程建设等造成的海洋资源衰竭、海域污染和典型生态系统破坏等问题越来越严重<sup>[1,2]</sup>。联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)报告表明,全球85%的渔业资源处于完全开发或过度开发的状态<sup>[3]</sup>。另外,随着水温上升,沿海国家的水产养殖潜力会持续下降,特别是鲭鱼和双壳贝类(如牡蛎)<sup>[4]</sup>。有研究估计,到2300年世界渔业产量平均会下降20%,而北大西洋的渔业产量

将下降近60%,西太平洋大部分地区的渔业产量将下降50%以上<sup>[5]</sup>。海洋变暖只是影响海洋渔业产量的众多过程之一,海洋酸化、氧气含量下降和栖息地丧失也给海洋生物的生存带来持续威胁<sup>[6]</sup>。

不断增长的饮食需求使欧洲许多渔场面临压力,例如地中海90%以上的鱼类资源被过度开发。为解决该问题,欧盟已通过“地平线2020”资助计划,在2018年至2020年间共资助1.665亿欧元支持可持续的海洋资源捕捞<sup>[7]</sup>。美国国家大气与海洋管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)在其新一代战略规划中,着重强调保

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(42030408)资助。

### 【作者简介】

张灿影(1988-),女,馆员,主要从事文献计量、海洋科技情报监测与编译研究,E-mail:zhangcanying@qdio.ac.cn。

### 【\*\*通信作者】

冯志纲(1972-),男,研究馆员,主要从事海洋科技情报服务研究,E-mail:zhi@qdio.ac.cn。

### 【引用本文】

张灿影,孙景春,鲁景亮,等. 国际人工鱼礁研究现状与态势分析[J]. 广西科学,2021,28(1):1-10.

ZHANG C Y, SUN J C, LU J L, et al. The Status and Trend of International Artificial Reefs Research [J]. Guangxi Sciences, 2021, 28(1): 1-10.

护、恢复和管理海岸带与海洋资源,规范海洋渔业,保护濒危海洋物种和恢复生境等,维持健康、富有生产力的生态系统<sup>[8]</sup>。联合国教科文组织(UNESCO)发布的《联合国海洋科学促进可持续发展十年(2021-2030)路线图》(*Roadmap of United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development, 2021-2030*)报告提出6个具体的高级目标,其中之一就是基于海洋生态系统管理,形成良好的海洋生态环境,促进海洋健康发展,支持蓝色经济<sup>[9]</sup>。联合国开发计划署(UNDP)联合全球环境基金(GEF)等相关组织发布《弄潮:社区推动海洋可持续发展》(*Making Waves: Community Solutions, Sustainable Oceans*),报告重点关注海洋生态环境保护与海洋资源可持续利用,提出通过划分海洋保护区、缓冲区,以及开展季节性禁渔来保护和恢复海洋渔业资源,通过发展可持续渔业和海洋水产养殖等方式改善海洋生物多样性丧失、鱼类栖息地缺乏保护和渔业过度捕捞的现状<sup>[10]</sup>。

针对海洋渔业可持续发展出现的瓶颈问题,作为有效的鱼类诱集设施和重要的渔业管理工具,很多国家开始大力开展人工鱼礁(Artificial reefs, ARs)研究与建设<sup>[2,11-13]</sup>。人工鱼礁最突出的用途是增殖资源、提高渔获量和支持潜水等娱乐休闲活动<sup>[14]</sup>,最近几十年,被广泛用于修复、改善和优化水生生物栖息环境,是海洋生境修复和生物资源养护的一项有效措施<sup>[1,15]</sup>。

国内外学者紧密围绕人工鱼礁这一主题开展了大量的研究工作,产出了丰富的研究成果。科学引文索引(Science Citation Index Expanded, SCIE)数据库收录了世界各学科领域内最优秀的科技期刊,其收

录的文献能够从宏观层面反映出科学研究的发展动态。因此,本研究以SCIE数据库为基础,采用文献计量的方法对人工鱼礁的研究国家以及国际研究进展进行分析,了解该研究领域的发展态势,把握相关研究的整体发展状况,以期为我国人工鱼礁研究与建设提供参考。

## 1 数据来源与分析工具

本研究以科学引文索引(Science Citation Index Expanded, SCIE)数据库为基础,以人工鱼礁作为主题词TS=("artificial reef\*" OR "artificial fish reef\*" OR "artificial marine habitat")进行检索,文章类型为Article、Processedings paper和Review,检索时间截至2019年8月11日,将数据进行合并、去重和清洗处理,最终得到1391条数据。主要采用科睿唯安开发的文献专利信息分析工具Derwent Data Analyzer (DDA)进行数据分析。

## 2 整体科研产出情况

从发文时间来看,SCIE数据库中最早有关人工鱼礁的论文发表于1968年,由加拿大渔业研究委员会Scarratt撰写,该论文概述了人工设置的岩石鱼礁中美国龙虾的生长状况<sup>[16]</sup>。该鱼礁是由直径1m大小的砂岩构成,覆盖近3000m<sup>2</sup>。研究中提到:在最初的两年中,龙虾的增量速度很慢,但在7年内,外来龙虾的生物量超过了附近自然区域<sup>[16]</sup>。

1989年以前,人工鱼礁每年的论文数量均在20篇以下(图1),1989年共发表36篇,其中美国26篇,意大利5篇,日本4篇,哥斯达黎加、法国和牙买加各参与1篇。美国发文数量的激增与1985年出台的

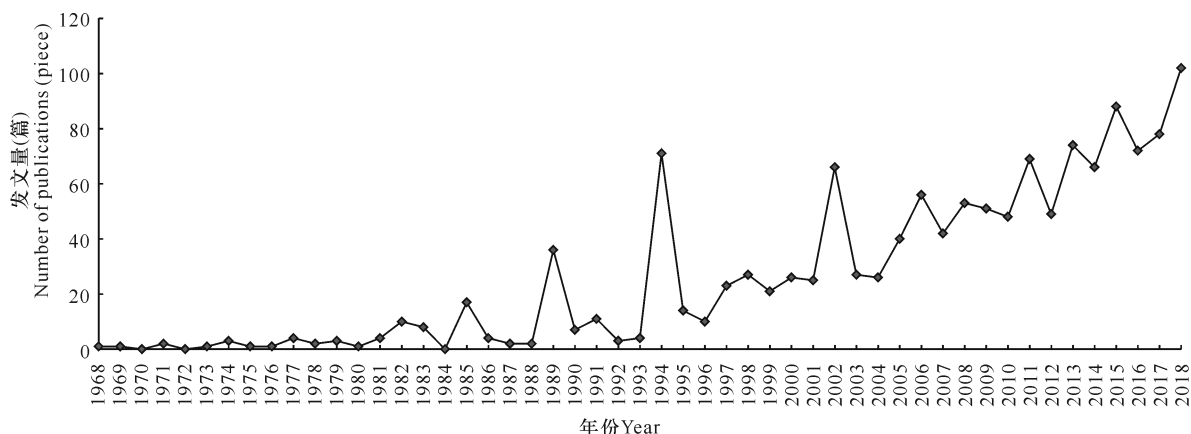


图1 人工鱼礁 SCI 历年发文量

Fig. 1 Annual publications about artificial reefs in SCI

国人工鱼礁计划大背景密不可分,此时人工鱼礁的效用已得到普遍认可。但研究人员同时也指出,先前的大部分研究仅仅是定性描述,虽然可以观察到人工鱼礁建设区内物种的演替变化,但缺乏定量的实验数据来支持人工鱼礁的生态效应;未来人工鱼礁建设应该基于科学的实验方法进行尺寸设计和投放位置的确定,并改进监测人工鱼礁生态群落和生物量变化的技术方法<sup>[17]</sup>。

1968年到21世纪初,美国、英国、以色列和日本是人工鱼礁研究的主要国家,随后,意大利、中国、法国和葡萄牙等国家的研究人员开始关注这一主题,导致人工鱼礁研究发文数量的增加,但年均产出论文数量不多,仅43.07篇。

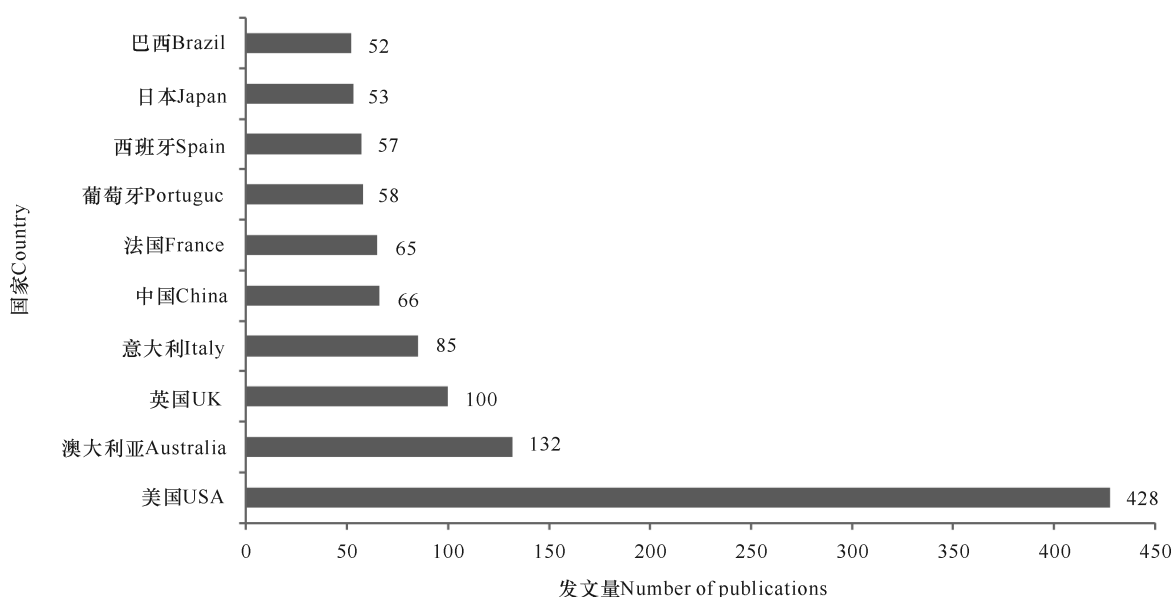


图2 国际人工鱼礁发文量 Top 10 的国家

Fig.2 Top 10 countries of international ARs publications

### 3.2 主要国家人工鱼礁研究与建设情况

美国的人工鱼礁发展起步较早。第一次有文献记载的美国人工鱼礁建设始于19世纪30年代,在南卡罗来纳附近,使用的材料是木材。20世纪50年代,墨西哥湾也开始人工鱼礁建设<sup>[18]</sup>。美国早期大多由市民志愿者利用废弃物建设大型鱼礁,预算较低,且通常放置在近海深水区,可供休闲渔业使用<sup>[17]</sup>。1984年,美国国会通过《国家渔业增值提案》,并提出应针对人工鱼礁制定国家计划;1985年,美国国家渔业局(NMFS)出台美国人工鱼礁计划,重点明确了用于人工鱼礁建设的材料标准,包括功能、兼容性、耐久性、稳定性以及可用性<sup>[19]</sup>;随后,得克萨斯州<sup>[20]</sup>和佛罗里达州<sup>[21]</sup>分别于1990年和1992年发布

## 3 主要发文国家人工鱼礁建设情况

### 3.1 主要发文国家

截至检索日,按照论文作者所属国家统计(论文署名地址包含该国家均计入数据),国际上人工鱼礁研究发文量前10的国家分别是美国(428篇)、澳大利亚(132篇)、英国(100篇)、意大利(85篇)、中国(66篇)、法国(65篇)、葡萄牙(58篇)、西班牙(57篇)、日本(53篇)和巴西(52篇)(图2),其中美国发文量占全部发文量的30.77%。我国虽然人工鱼礁SCI发文数量不多,但2016-2018年这3年的发文数量占全部发文的40.91%,正处于快速发展时期。

人工鱼礁计划,旨在监测和加强州附近海域的人工鱼礁建设。

美国人工鱼礁的规划主体是州政府,建设者主要是企业、民间组织(钓鱼协会、潜水协会等)<sup>[12]</sup>。目前有15个州参与人工鱼礁建设,佛罗里达州是美国实施人工鱼礁项目最先进地区之一,每年部署100多个人工鱼礁,以应对渔业枯竭和栖息地退化,三十多年来,佛罗里达海洋基金在该州人工鱼礁项目的发展中发挥了领导作用<sup>[22]</sup>。目前,大西洋中部地区有130多个人工鱼礁区<sup>[23]</sup>,得克萨斯州墨西哥湾海域有66个人工鱼礁区<sup>[13]</sup>。

第一个有文献记载的澳大利亚人工鱼礁建设开始于1965年。渔业管理机构和公共利益团体提出在

菲利普湾港部署人工鱼礁,以提高渔获量并可用于潜水娱乐,主要建设材料包括轮胎、混凝土、岩石以及废弃船只<sup>[24,25]</sup>。1981年《环境保护(海上倾倒)法》[*Environment Protection (Sea Dumping) Act 1981*]的实施,使得澳大利亚人工鱼礁的安置和建造更加规范。人工鱼礁的建立需要向澳大利亚环境和遗产部或澳大利亚大堡礁海洋公园管理局申请许可证,其建设的主要材料包括水泥、人工平台和船舶等<sup>[26]</sup>。目前西澳大利亚州已投放6个大型人工鱼礁,主要为参孙鱼、粉红鲷鱼和银鱼等物种提供栖息地<sup>[27]</sup>。2013年,作为西南人工鱼礁项目的一部分,西澳大利亚州初级生产部与 Recfish West 耗资238万美元,在邓斯伯勒和班伯里分别建立了两个大型人工鱼礁。每个鱼礁由30个10 t重的钢筋混凝土模块组成,分布在4 hm<sup>2</sup>的人工鱼礁区域<sup>[28]</sup>。自从部署人工鱼礁以后,2015年上述两个地区调查鱼类种数由12种增加到50种以上,2016年调查鱼类种数则分别增加到130种和126种<sup>[29]</sup>。

法国、葡萄牙和西班牙等欧洲国家人工鱼礁建设最早分别可追溯到1968年、1989年和1987年<sup>[15,30,31]</sup>,主要用于提高渔获量并防止拖网等大型渔具的捕捞行为<sup>[15,32,33]</sup>。1995年,欧洲委员会资助设立欧洲人工鱼礁研究网络(European Artificial Reef Research Network, EARRN),来自意大利、法国、西班牙、葡萄牙、英国、荷兰、芬兰和德国的36个实验室共51位研究人员构成了最初的研究团队,以促进区域合作并指导欧洲未来人工鱼礁建设工作。

日本的人工鱼礁技术处于世界领先地位<sup>[14]</sup>。1916年,日本开始使用废弃的军舰艇作为人工鱼礁。1952年,日本政府推出五年计划,利用混凝土块建设人工鱼礁<sup>[31]</sup>。1954年,日本政府开始有计划地

投资建设规模较小的人工鱼礁,1958年则着手较大规模的人工鱼礁建设。1974年,日本政府颁布了对渔业产生重大影响的《沿岸渔场整修开发法》。1976年,日本开始规模宏大的沿岸渔场整治开发工程,包括沿海人工鱼礁建设、养殖场建设和环境保护,并从工程学、生物学和经济学等多个角度开展人工鱼礁科学研究,以支撑人工鱼礁科学建设<sup>[12,34-36]</sup>。

#### 4 国际主要研究内容

论文的关键词能鲜明而直观地表述文献论述或表达的主题,许多学者利用作者关键词分析某一领域的主要研究内容和热点前沿趋势,比如安全文化<sup>[37]</sup>、黑潮<sup>[38]</sup>以及牡蛎<sup>[39]</sup>等领域。1968-2019年,1391篇有关人工鱼礁的SCI论文中共有2655个作者关键词,其中75.82%(2013个)的作者关键词只出现1次,而11.53%(306个)的作者关键词仅出现2次。除人工鱼礁(Artificial reefs)外,珊瑚礁(Coral reefs)、珊瑚礁鱼类(Coral reef fish)、鱼类群聚(Fish assemblages)、亚海(Adriatic Sea)、地中海(Mediterranean Sea)、声波遥测(Acoustic telemetry)、渔业管理(Fisheries management)、环境影响(Environmental impact)、墨西哥湾(Gulf of Mexico)、捕食(Predation)以及修复(Restoration)等作者关键词都出现20次以上,研究地域主要分布于亚得里亚海、地中海、墨西哥湾和红海等海域,主要作者关键词可以具体分为四大研究主题(表1)。从作者关键词来看,目前大多数关于人工鱼礁的研究主要集中于生态学方面,包括人工鱼礁群落结构、增殖资源、鱼类诱集效果以及生态修复等,工程学方面则主要是人工鱼礁设计、布局以及水动力学研究,另外还有生态和经济效益评价研究。

表1 人工鱼礁主要研究内容

Table 1 Main research contents of ARs

研究主题 Research theme	主要作者关键词 Major author keywords
生物群落结构与环境因子的相关性研究 Study on the correlation between biological community structure and environmental factors	Coral reefs, Colonization, Biodiversity, Acoustic telemetry, Fisheries management, Environmental impact, Predation, Restoration, Habitat, Benthic communities, Complexity, Community structure, Monitoring, Stable isotope, Food web, Numerical modelling, Community composition
生物诱集效果研究 Study on biological trapping effect	Fish assemblages, Recruitment, Benthos, Red snapper, Offshore fish community, Invasive species, Movement, Aggregation, Structural complexity, Diet, Stock enhancement, Wind farm, Crassostrea virginica, Fisheries enhancement
工程学研究 Engineering research	Wind farm, Rigs-to-reefs, Oil and gas platforms, Flow field, Hydrodynamic force, Wind farm, Site fidelity, Coastal erosion, Design, GIS, Reef design, Remote sensing, Site selection
社会和经济效益研究 Socioeconomic research	Ecosystem services, Recreational fishing, Diving, Ecological restoration, Dive tourism, Overfishing



#### 4.1 生物群落结构与环境因子的相关性研究

生态学研究占人工鱼礁全部发文比例最高,一直是重点研究内容之一。人工鱼礁虽然是恢复渔业资源和修复受损沿海生态系统的有效措施之一,但不能保证任何时刻都能起到增殖渔业资源的作用,因此有必要深入研究影响人工鱼礁生物群落分布的主要环境影响因子<sup>[40]</sup>。人工鱼礁生物群落的构成与礁体结构、环境因素有关,如礁体形态的复杂度、基底性质、放置深度及其与自然礁区的距离等<sup>[41]</sup>,其他环境因子还包括温度、盐度、溶解氧、pH 值、水流强度和波浪作用等<sup>[40,42]</sup>。Coll 等<sup>[43]</sup>在分析地中海西部福尔梅特拉岛上人工鱼礁区生物群落组成时发现,人工鱼礁原始基底是影响礁区生物群落组成的第一要素,季节变化是第二要素。也有研究表明,水温是人工鱼礁向鱼类群落提供庇护所、食物资源、产卵栖息地,促进繁殖的关键因素<sup>[17]</sup>,在高温季节里,混凝土材料构建的人工鱼礁中生物种类和数量相对较高<sup>[40]</sup>。人工鱼礁深度对附着生物分布有重要影响,是制约人工鱼礁区生物群落类型和分布格局的主要因素<sup>[44-46]</sup>,有研究表明固着生物量随人工鱼礁深度的增加而减少<sup>[46,47]</sup>,50-60 m 深处是人工鱼礁区生物量和生物多样性相对较高的区域<sup>[45]</sup>。

#### 4.2 生物诱集功能研究

鱼礁投放后所产生的各种效应,如饵料效应、流场效应和音响效应等,在不同程度上吸引鱼类的聚集,导致礁区周围生物量的增加<sup>[48,49]</sup>。目前国际上围绕人工鱼礁生物诱集功能的研究主要集中在生物诱集效果评价、诱集效果影响因素以及人工鱼礁对鱼类行为的影响等 3 个方面。

相比于自然礁体对照区,多项研究表明人工鱼礁生境下鱼类种类丰富度、多样性和生物量更高<sup>[50,51]</sup>。人工鱼礁形状和结构的复杂性直接影响生物的遮蔽空间,是影响礁区生物群落结构的重要属性<sup>[52,53]</sup>。其他设计因素,如人工鱼礁构建材料<sup>[54-57]</sup>、人工鱼礁数量<sup>[58]</sup>、礁区面积<sup>[59]</sup>、礁体孔洞数量<sup>[59]</sup>、人工鱼礁空间布局<sup>[60-62]</sup>等也会不同程度地影响礁区生物诱集效果。这些研究表明,人工鱼礁生物量、丰富度和多样性程度随人工鱼礁投放数量、礁区面积、礁体孔洞数量、礁体形状的多样性程度线性增加,不同建设材料和结构吸引的生物种类存在差异。因此,人工鱼礁的设计和投放取决于投放环境的具体特征和预期取得的效果<sup>[63]</sup>。

人工鱼礁是为重要经济鱼类营造适宜栖息环境

的途径之一,其对重要经济鱼类行为的影响也是研究人员关注热点之一。红鲷鱼 red snapper (*Lutjanus campechanus*)是美国人工鱼礁中数量最丰富的鱼类物种之一<sup>[64]</sup>,也是研究较多的典型鱼类之一。多位研究人员利用标记重捕方法和声波遥测等技术研究人工鱼礁区域红鲷鱼的滞留时间、栖息地忠诚度和运动行为特征,研究结果均表明人工鱼礁是红鲷鱼的重要栖息地,是有效的鱼类管理工具。Szedlmayer<sup>[65]</sup>研究表明红鲷鱼在人工鱼礁区停留时间为 17-597 d;Szedlmayer 等<sup>[66]</sup>的研究结果则表明其停留时间为 1-595 d,其中 67% 的红鲷鱼在人工鱼礁上的停留时间为长期(117-595 d),13% 的红鲷停留时间为 8-91 d,20% 的红鲷停留时间少于 4 d。Schroepfer 等<sup>[67]</sup>研究结果表明,红鲷鱼在人工鱼礁区的平均停留时间为 373 d。红鲷鱼具有较高的人工鱼礁栖息地忠诚度,生活在距离人工鱼礁 100 m 的范围内,其中 75% 的红鲷鱼在 30 m 范围内,且在夜里的活动距离比白天距离远,离鱼礁的距离随鱼体的增大而增大<sup>[68]</sup>,离开人工鱼礁往往发生在夜间<sup>[69]</sup>。

#### 4.3 工程学研究

从 SCI 发文来看,人工鱼礁工程学主要研究人工鱼礁建筑材料、人工鱼礁结构设计、流体力学和水动力学等方面。人工鱼礁建筑材料多种多样,礁体材料的选择直接影响礁体的结构特征<sup>[70]</sup>,且不同材料人工鱼礁生物诱集效果和经济效益差异显著<sup>[57]</sup>。混凝土因结构稳定,很容易用于制造复杂形状和大型空心形状结构,是最常用的人工鱼礁建筑材料<sup>[31-32]</sup>,但其成本相比其他材料较高<sup>[71]</sup>。进入 21 世纪,人工鱼礁工程学领域提出生态材料的概念。因此,为提高普通混凝土的施工性能、机械性能和黏性等特性,诸多学者改良研发出新型人工鱼礁混凝土,包括硫酸铝盐水泥,海砂和海水混凝土<sup>[72]</sup>,以粒状高炉矿渣、钢渣和烟气脱硫石膏等工业废料为主要原料的绿色混凝土<sup>[73]</sup>,以及以硫铝酸盐水泥(SAC)、海水和海砂为原料的经济型低碱度的混凝土<sup>[74]</sup>。

在已发表的论文中有多个研究成果表明,海上风电场和石油钻井平台能为鱼类等海洋生物提供发育和生长繁殖场所,具有人工鱼礁功能,起到保护和增殖渔业资源的作用。研究人员建议世界各地的政府机构暂时停止对石油钻井平台、风力涡轮机和其他海上基础设施的强制性退役拆除,将废弃平台、废弃设施改造为人工鱼礁,这样能够节约拆除成本、降低海上作业的风险,同时减小对海洋生态环境的

影响<sup>[64,75-78]</sup>。

人工鱼礁流场效应是影响渔业资源增殖的重要因素。人工鱼礁投放后产生的上升流和背涡流能促进不同层次海水交换,改善鱼群觅食条件,提高礁区周围物种的丰富度和活跃度,其规模是评价人工鱼礁流场效应的重要指标<sup>[79-81]</sup>。目前,人工鱼礁流场效应研究主要围绕流场效应的主要影响因素展开,包括人工鱼礁投放位置和布局<sup>[82-84]</sup>、来流速度<sup>[85]</sup>、人工鱼礁数量<sup>[86]</sup>、人工鱼礁结构<sup>[87,88]</sup>、海底地形<sup>[89]</sup>和开口比<sup>[90]</sup>等,研究方法多采用 k- $\epsilon$  湍流模型<sup>[86]</sup>、水槽实验<sup>[88]</sup>、CFD 仿真<sup>[82,87]</sup>、PIV 技术<sup>[82,85]</sup>和有限体积数值<sup>[89]</sup>等方法。

#### 4.4 社会、生态和经济效益研究

多项研究表明,人工鱼礁的部署能给当地渔民带来可观的经济效益,增加渔民收入<sup>[91,92]</sup>,还可增加海上休闲捕鱼和潜水的机会。企业、民间组织(钓鱼协会、潜水运营商等),通过建造人工鱼礁吸引垂钓爱好者和潜水人员前来进行休闲活动,促进休闲渔业和旅游业的发展。除当地租船公司、潜水和捕鱼设备商店外,酒店和餐馆等也可能受益于人工鱼礁的开发。但如果人工鱼礁仅仅是吸引建设区内的鱼类聚集,而未增加生物资源总量,则有可能导致过度捕捞<sup>[17]</sup>。因此研究强调,为防止过度捕捞,需要制定明确的开发战略,以控制人工鱼礁周围的捕捞活动<sup>[93]</sup>。

人工鱼礁建设刺激当地旅游与娱乐活动发展,直接影响当地的社会和经济,提高当地经济实力<sup>[94]</sup>。有调查研究显示,2000年6月至2001年5月这一年,美国佛罗里达州布劳沃德县的人工鱼礁吸引近400万游客,为当地经济带来9.61亿美元的销售额以及5.02亿美元的收入,增加就业岗位约1.7万个<sup>[95]</sup>。昆士兰州伯内特海岸的科克伦人工鱼礁每年为该地区带来大约100万澳元收入<sup>[96]</sup>,美国得克萨斯州沿岸人工鱼礁区的渔业休闲活动占全部活动的40%<sup>[13]</sup>。Chen等<sup>[97]</sup>认为人工鱼礁可以给当地带来可观的经济效益,并利用旅行成本法(Travel Cost Method, TCM)和条件价值法(Contingent Valuation Method, CVM)评估台湾澎湖人工鱼礁的旅游娱乐价值,认为人工鱼礁门票估计年收入约170万美元到190万美元,渔船捕鱼和潜水的年经济价值分别为3700万美元和5200万美元,并建议在人工鱼礁选址时应考虑潜水和休闲捕鱼等娱乐活动的开发。

为最大化实现人工鱼礁社会经济价值<sup>[14]</sup>,Sutton等<sup>[14]</sup>建议人工鱼礁建设计划、实施和管理过程应

包括以下步骤:(1)评估当地对人工鱼礁的需求;(2)咨询利益相关者;(3)进行成本/效益分析;(4)决定是否进行人工鱼礁建设;(5)让利益相关者参与规划和管理过程;(6)制定明确的社会经济目标;(7)考虑社会经济适当管理计划中的问题;(8)监督和评估社会和经济问题。

从不同国家作者发文来看,各个国家研究各有侧重,各具特色。其中,中国、韩国和日本等亚洲国家更关注人工鱼礁建设区流场效应和人工鱼礁新型材料研究,美国在人工鱼礁区生物群落生态结构以及规划管理方面研究比较突出,澳大利亚学者更注重人工鱼礁与自然礁区之间的比较研究,欧洲国家则在人工鱼礁社会经济价值和生态效益研究方面研究成果较多。

## 5 结论

本文通过综合分析 SCIE 数据库中人工鱼礁研究论文,挖掘国际人工鱼礁整体研究现状,深入分析国际研究重点方向,并调研发文量靠前国家,包括美国、澳大利亚、日本和欧洲国家人工鱼礁建设情况。研究发现全球年均产出论文数量虽然不多,但发文数量整体呈增长趋势。美国是人工鱼礁研究发文数量最多的国家。国际研究主题主要包括人工鱼礁区生物群落结构与环境因子的相关性研究、人工鱼礁生物诱集效果研究、工程学研究以及社会、经济效益研究,且各国研究各有侧重、各具特色,研究内容因建设目标而异。

从 SCI 发文来看,我国在人工鱼礁所产生的社会和经济评价方面产出较少。为进一步促进海洋渔业资源和海洋生态环境的可持续发展,未来我国人工鱼礁建设应强化科研与实践的结合,以科学研究指导人工鱼礁建设实践,在材料选择和结构设计方面应更加规范化和科学化,并建立人工鱼礁生态和社会经济影响监测、评估方法体系,确保人工鱼礁的建设达到预期效果。

#### 参考文献

- [1] 张立斌,杨红生. 海洋生境修复和生物资源养护原理与技术研究进展及展望[J]. 生命科学, 2012, 24(9): 1062-1069.
- [2] FANG L C, CHEN P M, CHEN G B, et al. Preliminary evaluation on resources enhancement of artificial reef in the east corner of Zhelang Shanwei [J]. Asian Agricultural Research, 2013, 5(9): 111-115.
- [3] FAO. Fisheries and aquaculture statistics 2008-2011 [EB/OL]. [2020-06-05]. <http://epub.sub.uni-ham->

- burg. de/epub/volltexte/2014/28012/pdf/yearbook \_ 2011. pdf.
- [4] FROEHLICH H E, GENTRY R R, HALPERN B S. Global change in marine aquaculture production potential under climate change [J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2018, 2(11): 1745-1750.
- [5] MOORE J K, FU W W, PRIMEAU F, et al. Sustained climate warming drives declining marine biological productivity [J]. *Science*, 2018, 359(6380): 1139-1143.
- [6] FREE C M, THORSON J T, PINSKY M L, et al. Impacts of historical warming on marine fisheries production [J]. *Science*, 2019, 363(6430): 979-983.
- [7] STEVE G. Marine scientists steer trawlers away from sensitive sea floors [EB/OL]. [2020-06-05]. <https://horizon-magazine.eu/article/marine-scientists-steer-trawlers-away-sensitive-sea-floors.html>.
- [8] NOAA. NOAA's next-generation strategic plan version 4.0 [EB/OL]. [2020-06-10]. [https://www.glerl.noaa.gov/review2010/guiding\\_docs/NOAA\\_NGSP.pdf](https://www.glerl.noaa.gov/review2010/guiding_docs/NOAA_NGSP.pdf).
- [9] UNESCO. Roadmap for using the UN decade of ocean science for sustainable development [EB/OL]. [2020-06-13]. [http://www.unesco.org/new/en/member-states/single-view/news/roadmap\\_for\\_the\\_un\\_decade\\_of\\_ocean\\_science\\_for\\_sustainable\\_d/](http://www.unesco.org/new/en/member-states/single-view/news/roadmap_for_the_un_decade_of_ocean_science_for_sustainable_d/).
- [10] PARTNERS G. Making waves: Community solutions, sustainable oceans [EB/OL]. (2017-06-04). <https://www.undp.org/content/undp/en/home/librarypage/poverty-reduction/equator-initiative/making-waves-community-solutions-sustainable-oceans.html>.
- [11] 陈勇,于长清,张国胜,等. 人工鱼礁的环境功能与集鱼效果[J]. *大连海洋大学学报*, 2002, 17(1): 64-69.
- [12] 于沛民,张秀梅. 日本美国人工鱼礁建设对我国的启示[J]. *渔业现代化*, 2006(2): 6-7, 20.
- [13] 刘敏,董鹏,刘汉超. 美国德克萨斯州人工鱼礁建设及对我国的启示[J]. *海洋开发与管理*, 2017, 34(4): 21-25.
- [14] SUTTON S G, BUSHNELL S L. Socio-economic aspects of artificial reefs: Considerations for the Great Barrier Reef Marine Park [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2007, 50(10): 829-846.
- [15] TESSIER A, FRANCOUR P, CHARBONNEL E, et al. Assessment of French artificial reefs: Due to limitations of research, trends may be misleading [J]. *Hydrobiologia*, 2015, 753(1): 1-29.
- [16] SCARRATT D J. An artificial reef for lobsters (*Homarus americanus*) [J]. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1968, 25(12): 2683-2690.
- [17] BOHNSACK J A, SUTHERLAND D L. Artificial reef research; A review with recommendations for future priorities [J]. *Bulletin of Marine Science*, 1985, 37(1): 11-39.
- [18] MCGURRIN J M, STONE R B, SOUSA R J. Profiling United States artificial reef development [J]. *Bulletin of Marine Science*, 1989, 44(2): 1004-1013.
- [19] ANSLEY H, BAILEY C M, BELL M, et al. Guidelines for marine artificial reef materials [EB/OL]. [2020-07-06]. <https://myfwc.com/media/4892/artificialreef-materialsguidelines.pdf>.
- [20] STEPHAN C D, DANSBY B G, OSBURN H R, et al. Texas artificial reef fishery management plan Volume 3: Executive summary [EB/OL]. [2020-07-05]. <https://tamug-ir.tdl.org/handle/1969.3/21359>.
- [21] Florida Fish and Wildlife Conservation Commission. State of florida artificial reef strategic plan [EB/OL]. [2020-07-05]. <https://myfwc.com/media/4889/flarstrategicplan2.pdf>.
- [22] Florida Fish and Wildlife Conservation Commission. Artificial reefs [EB/OL]. [2020-07-05]. <https://myfwc.com/fishing/saltwater/artificial-reefs/>.
- [23] Mid-Atlantic Fishery Management Council. Mid-Atlantic artificial reefs [EB/OL]. [2020-07-07]. <http://www.mafmc.org/artificial-reefs/>.
- [24] POLLARD D A. Artificial habitats for fisheries enhancement in the Australian region [J]. *Marine Fisheries Review*, 1989, 51(4): 11-26.
- [25] BRANDEN K L, POLLARD D A, REIMERS H A. A review of recent artificial reef developments in Australia [J]. *Bulletin of Marine Science*, 1994, 55(2/3): 982-994.
- [26] Australian Government Department of the Environment and Energy. Artificial reefs [EB/OL]. [2020-07-07]. <http://www.environment.gov.au/marine/publications/factsheet-artificial-reefs>.
- [27] Recfishwest. Artificial reefs [EB/OL]. [2020-07-07]. <https://recfishwest.org.au/our-services/artificial-reefs/>.
- [28] Department of Primary Industries and Regional Development. Artificial reefs [EB/OL]. [2020-07-08]. <http://www.fish.wa.gov.au/Fishing-and-Aquaculture/Recreational-Fishing/Artificial-Reefs/Pages/default.aspx>.
- [29] Department of Primary Industries and Regional Development. Artificial reefs monitoring results [EB/OL]. [2020-07-09]. <http://www.fish.wa.gov.au/Fishing-and-Aquaculture/Recreational-Fishing/Artificial-Reefs/Pages/Artificial-reefs-monitoring-results.aspx>.
- [30] SANTOS M N, MONTEIRO C C. The Olhão artificial reef system (south Portugal): Fish assemblages and fishing yield [J]. *Fisheries Research*, 1997, 30(1): 33-41.
- [31] LEE M C, OTAKE S, KIM J K. Transition of artificial reefs (ARs) research and its prospects [J]. *Ocean and Coastal Management*, 2018, 154: 55-65.
- [32] BAINE M. Artificial reefs: A review of their design, application, management and performance [J]. *Ocean and Coastal Management*, 2001, 44(3): 241-259.



- [33] JENSEN A C, COLLINS K J, LOCKWOOD A P M. Artificial reefs in European Seas [M]. Dordrecht: Springer, 2000: 249-261.
- [34] 刘惠飞. 日本人工鱼礁建设的现状[J]. 现代渔业信息, 2001, 16(12): 15-17.
- [35] 刘同渝. 国内外人工鱼礁建设状况[J]. 渔业现代化, 2003(2): 36-37.
- [36] 杨卫. 日本海洋渔业资源增殖研究及启示[J]. 中国水产, 2011(12): 74-75.
- [37] NUNEN K V, LI J, RENIERS G, et al. Bibliometric analysis of safety culture research [J]. Safety Science, 2017, 108: 248-258.
- [38] 张灿影, 冯志纲, 张晓琨, 等. 黑潮研究进展分析[J]. 世界科技研究与发展, 2017, 39(3): 239-249.
- [39] GUO L, XU F, FENG Z, et al. A bibliometric analysis of oyster research from 1991 to 2014 [J]. Aquaculture International, 2015, 24(1): 327-344.
- [40] NOH J, RYU J, LEE D, et al. Distribution characteristics of the fish assemblages to varying environmental conditions in artificial reefs of the Jeju Island, Korea [J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 118(1/2): 388-396.
- [41] SEAMAN J W, SPRAGUE L M. Artificial habitats for marine and freshwater fisheries [M]. San Diego: Academic Press, 1991: 61-107.
- [42] ERFTEMEIJER P, DEGRAAFF R, BOOT G, et al. Site-selection for artificial reefs in Bahrain based on GIS-technology and hydrodynamic modeling [J]. Journal of Marine Science and Environment, 2004, C2: 29-38.
- [43] COLL J, MORANTA J, REONES O, et al. Influence of substrate and deployment time on fish assemblages on an artificial reef at Formentera Island (Balearic Islands, Western Mediterranean) [J]. Hydrobiologia, 1998, 385(1): 139-152.
- [44] 张伟, 李纯厚, 贾晓平, 等. 环境因子对大亚湾人工鱼礁上附着生物分布的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4053-4060.
- [45] AJEMIAN M J, WETZ J J, SHIPLEY-LOZANO B, et al. An analysis of artificial reef fish community structure along the Northwestern Gulf of Mexico Shelf: Potential impacts of "Rigs-to-Reefs" programs [J]. PLOS ONE, 2015, 10(5): e0126354. DOI: 10.1371/journal.pone.0126354.
- [46] MOURA A, BOAVENTURA D, CÚRDIA J, et al. Effect of depth and reef structure on early macrobenthic communities of the Algarve artificial reefs (Southern Portugal) [J]. Hydrobiologia, 2007, 580(1): 173-180.
- [47] RELINI G, ZAMBONI N, TIXI F, et al. Patterns of sessile macrobenthos community development on an artificial reef in the gulf of Genoa (Northwestern Mediterranean) [J]. Bulletin of Marine Science, 1994, 55(2/3): 745-771.
- [48] 袁华荣, 陈丕茂, 李辉权, 等. 雷州乌石人工鱼礁渔业资源增殖效果初步评价[J]. 上海海洋大学学报, 2011, 20(6): 883-889.
- [49] 周艳波, 蔡文贵, 陈海刚, 等. 人工鱼礁生态诱集技术的机理及研究进展[J]. 海洋渔业, 2010, 32(2): 225-230.
- [50] FABI G, FIORENTINI L. Comparison between an artificial reef and a control site in the Adriatic Sea: Analysis of four years of monitoring [J]. Bulletin of Marine Science, 1994, 55(2/3): 538-558.
- [51] RILOV G, BENAYAHU Y. Fish assemblage on natural versus vertical artificial reefs: The rehabilitation perspective [J]. Marine Biology, 2000, 136(5): 931-942.
- [52] SHERMAN R L, GILLIAM D S, SPIELER R E. Artificial reef design: Void space, complexity, and attractants [J]. ICES Journal of Marine Science, 2002, 59(suppl): 196-200.
- [53] SPAGNOLO A, CUICCHI C, PUNZO E, et al. Patterns of colonization and succession of benthic assemblages in two artificial substrates [J]. Journal of Sea Research, 2014, 88: 78-86.
- [54] WOODHEAD P M J, JACOBSON M E. Epifaunal settlement, the processes of community development and succession over two years on an artificial reef in the New York bight [J]. Bulletin of Marine Science, 1985, 37(1): 364-376.
- [55] ANDERSON M J, UNDERWOOD A J. Effects of substratum on the recruitment and development of an intertidal estuarine fouling assemblage [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1994, 184(2): 217-236.
- [56] 张伟, 李纯厚, 贾晓平, 等. 不同材料人工鱼礁应用效果评价[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(30): 13203-13206, 13247.
- [57] 江艳娥, 陈丕茂, 林昭进, 等. 不同材料人工鱼礁生物诱集效果的比较[J]. 应用海洋学学报, 2013, 32(3): 418-424.
- [58] CHARBONNEL E, SERRE C, RUITTON S, et al. Effects of increased habitat complexity on fish assemblages associated with large artificial reef units (French Mediterranean coast) [J]. ICES Journal of Marine Science, 2002, 59(suppl): 208-213.
- [59] HACKRADT C W, FELIX-HACKRADT F C, GARCIA-CHARTON J A. Influence of habitat structure on fish assemblage of an artificial reef in Southern Brazil [J]. Marine Environmental Research, 2011, 72(5): 235-247.
- [60] JORDAN L K B, GILLIAM D S, SPIELER R E. Reef fish assemblage structure affected by small-scale spacing and size variations of artificial patch reefs [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2005, 326(2): 170-186.



- [61] YAMAMOTO K C, FREITAS C E, ZUANON J, et al. Fish diversity and species composition in small-scale artificial reefs in Amazonian floodplain lakes: Refugia for rare species [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 67: 165-170.
- [62] ZALMON L R, DE SA F S, NETO E J D, et al. Impacts of artificial reef spatial configuration on infaunal community structure - Southeastern Brazil [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2014, 454: 9-17.
- [63] LAN C H, CHEN C C, HSUI C Y. An approach to design spatial configuration of artificial reef ecosystem [J]. *Ecological Engineering*, 2004, 22(4/5): 217-226.
- [64] GALLAWAY B J, SZEDLMAYER S T, GAZEY W J. A life history review for red snapper in the Gulf of Mexico with an evaluation of the importance of offshore petroleum platforms and other artificial reefs [J]. *Reviews in Fisheries Science*, 2009, 17(1): 48-67.
- [65] SZEDLMAYER S T. Ultrasonic telemetry of red snapper, *Lutjanus campechanus*, at artificial reef sites in the Northeast Gulf of Mexico [J]. *Copeia*, 1997, 1997(4): 846-850.
- [66] SZEDLMAYER S T, SCHROEPFER R L. Long-term residence of red snapper on artificial reefs in the northeastern Gulf of Mexico [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2005, 134(2): 315-325.
- [67] SCHROEPFER R L, SZEDLMAYER S T. Estimates of residence and site fidelity for red snapper *Lutjanus campechanus* on artificial reefs in the northeastern Gulf of Mexico [J]. *Bulletin of Marine Science*, 2006, 78(1): 93-101.
- [68] TOPPING D T, SZEDLMAYER S T. Home range and movement patterns of red snapper (*Lutjanus campechanus*) on artificial reefs [J]. *Fisheries Research*, 2011, 112(1): 77-84.
- [69] TOPPING D T, SZEDLMAYER S T. Site fidelity, residence time and movements of red snapper *Lutjanus campechanus* estimated with long-term acoustic monitoring [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2011, 437: 183-200.
- [70] 赵海涛, 张亦飞, 郝春玲, 等. 人工鱼礁的投放区选址和礁体设计[J]. *海洋学研究*, 2006, 24(4): 69-76.
- [71] CHUA C Y Y, CHOU L M. The use of artificial reefs in enhancing fish communities in Singapore [J]. *Hydrobiologia*, 1994, 285(1/2/3): 177-187.
- [72] CHEN C, JI T, ZHUANG Y, et al. Workability, mechanical properties and affinity of artificial reef concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 98: 227-236.
- [73] HUANG X, WANG Z, LIU Y, et al. On the use of blast furnace slag and steel slag in the preparation of green artificial reef concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 112: 241-246.
- [74] XU Q, JI T, YANG Z X, et al. Preliminary investigation of artificial reef concrete with sulphoaluminate cement, marine sand and sea water [J]. *Construction and Building Materials* 2019, 211: 837-846.
- [75] FOWLER A M, ANNE-METTE J, SVENDSEN J C, et al. Environmental benefits of leaving offshore infrastructure in the ocean [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2018, 16(10): 571-578.
- [76] KRONE R, DEDERER G, KANSTINGER P, et al. Mobile demersal megafauna at common offshore wind turbine foundations in the German Bight (North Sea) two years after deployment - increased production rate of *Cancer pagurus* [J]. *Marine Environmental Research*, 2017, 123: 53-61.
- [77] ALMEIDA J P P G L. REEFS; An artificial reef for wave energy harnessing and shore protection - A new concept towards multipurpose sustainable solutions [J]. *Renewable Energy*, 2017, 114: 817-829.
- [78] 郑亚男. 海上退役采油平台造礁技术体系构建与示范研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [79] 于定勇, 杨远航, 李宇佳. 不同开口比人工鱼礁体水动力特性及礁体稳定性研究[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2019, 49(4): 128-136.
- [80] 姜少杰, 刘海敌, 吴伟, 等. 一种人工鱼礁的水动力学研究与建设效果评价[J]. *海洋学研究*, 2017, 35(2): 53-60.
- [81] 唐衍力, 龙翔宇, 王欣欣, 等. 中国常用人工鱼礁流场效应的比较分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(8): 97-103.
- [82] ZHENG Y X, LIANG Z L, GUAN C T, et al. Numerical simulation and experimental study of the effects of disposal space on the flow field around the combined three-tube reefs [J]. *China Ocean Engineering*, 2015, 29(3): 445-458.
- [83] LIU T L, SU D T. Numerical analysis of the influence of reef arrangements on artificial reef flow fields [J]. *Ocean Engineering*, 2013, 74: 81-89.
- [84] LIU Y, ZHAO Y P, DONG G H, et al. A study of the flow field characteristics around star-shaped artificial reefs [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2013, 39: 27-40.
- [85] JIANG Z Y, LIANG Z L, LIU Y, et al. Particle image velocimetry and numerical simulations of the hydrodynamic characteristics of an artificial reef [J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2013, 31(5): 949-956.
- [86] LI J, ZHENG Y X, GONG P H, et al. Numerical simulation and PIV experimental study of the effect of flow fields around tube artificial reefs [J]. *Ocean Engineering*, 2017, 134: 96-104.
- [87] JIANG Z, LIANG Z, ZHU L, et al. Numerical simulation of effect of guide plate on flow field of artificial reef [J]. *Ocean Engineering*, 2016, 116: 236-241.
- [88] JIANG Z, LIANG Z, HUANG L, et al. Characteristics from a hydrodynamic model of a trapezoidal artificial

- reef [J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2014, 32(6):1329-1338.
- [89] SU D T, LIU T L, OU C H. Numerical investigation into effects of seabed topography on flows in and around artificial reefs [J]. *Fisheries Science*, 2008, 74(2):236-254.
- [90] TANG Y L, YANG W Z, SUN L Y, et al. Studies on factors influencing hydrodynamic characteristics of plates used in artificial reefs [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2019, 18(1):193-202.
- [91] CROWDER L B, LYMAN S J, FIGUEIRA W F, et al. Source-sink population dynamics and the problem of siting marine reserves [J]. *Bulletin of Marine Science*, 2000, 66(3):799-820.
- [92] ISLAM G M N, NOH K M, SIDIQUE S F, et al. Economic impact of artificial reefs: A case study of small scale fishers in Terengganu, Peninsular Malaysia [J]. *Fisheries Research*, 2014, 151:122-129.
- [93] WHITMARSH D, SANTOS M N, RAMOS J, et al. Marine habitat modification through artificial reefs off the Algarve (Southern Portugal): An economic analysis of the fisheries and the prospects for management [J]. *Ocean and Coastal Management*, 2008, 51(6):463-468.
- [94] RENDLE E J, RODWELL L D. Artificial surf reefs: A preliminary assessment of the potential to enhance a coastal economy [J]. *Marine Policy*, 2014, 45:349-358.
- [95] The Broward County Board of County Commissioners. Reefs [EB/OL]. [2020-07-10]. <http://www.broward.org/naturalresources/beachandmarine/pages/reefs.aspx>.
- [96] Queensland Department of Primary Industries and Fisheries. Artificial attraction [EB/OL]. [2020-07-10]. <http://www.dpi.qld.gov.au/fish/14257.html>.
- [97] CHEN J L, CHUANG C T, JAN R Q, et al. Recreational benefits of ecosystem services on and around artificial reefs: A case study in Penghu, Taiwan [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2013, 85(Part A):58-64.

## The Status and Trend of International Artificial Reefs Research

ZHANG Canying<sup>1</sup>, SUN Jingchun<sup>1</sup>, LU Jingliang<sup>2</sup>, FENG Zhigang<sup>1</sup>

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong, 266071, China; 2. Lanzhou Information Center, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu, 730000, China)

**Abstract:** Artificial reefs (ARs) are an effective fish trapping facility and an important tool for fishery management. Based on the Science Citation Index Expanded (SCIE) database, a bibliometric method was employed to conduct a comprehensive analysis of the age of the international artificial reef research literature, key author keywords, research content, and the main construction of the country that issued the article. The analysis results show that the average annual output of international artificial reef research papers is small, and the United States is the country with the largest number of publications on artificial reef research. International research topics mainly include research on the correlation between biological community structure and environmental factors in artificial reef areas, research on biological trapping effects of artificial reefs, engineering research, and social and economic benefits research. Research in various countries has its own focus and characteristics. The research content varies with the construction objectives. The research results can provide a reference for the research and construction of artificial reefs in China.

**Key words:** artificial reefs, SCIE, status and trends, research hotspot, construction