

西沙群岛玉琢礁珊瑚礁鱼类种类组成及演变

谢宏宇^{1,2}, 刘 永^{1,2}, 赵金发^{1,2}, 李纯厚^{1,2}, 石 娟^{1,2}, 肖雅元^{1,2}, 王 腾^{1,2}

1. 中国水产科学研究院南海水产研究所/农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室/广东珠江口生态系统野外科学观测研究站/广东省渔业生态环境重点实验室, 广东 广州 510300
2. 三亚热带水产研究院/西沙岛礁渔业生态系统海南省野外科学观测研究站/海南省深远海渔业资源高效利用与加工重点实验室, 海南 三亚 572018

摘要: 玉琢礁是西沙群岛中的重要环礁, 拥有多样化的珊瑚礁生态系统和丰富的鱼类资源。为掌握玉琢礁珊瑚礁鱼类的资源状况及其演变特征, 于 2023 年采用手钓、水下潜捕、水下视频和 eDNA 等方法, 对其珊瑚礁鱼类资源进行调查。共发现鱼类 220 种, 其中 eDNA 方法共发现鱼类 111 种, 结合 2003 年中国水产科学研究院南海水产研究所的历史档案数据, 截至目前在玉琢礁共发现鱼类 265 种, 隶属于 12 目 50 科 128 属, 其中鲈形目占绝对优势。鱼类群落组成以小型鱼类为主, 平均分类差异指数 (Δ^+) 和变异分类差异指数 (Λ^+) 分别为 56.08 和 122.4; 相似性分析表明, 2003 与 2023 年之间, 鱼类在种类组成、食性组成和不同体型层面的相似性均表现为不相似或极不相似。与历史调查数据进行比较, 共有 45 种鱼类未被监测到, 其中大型肉食性鱼类受到自然与人类扰动的影响最为显著, 植食性鱼类所受到的影响相对较小, 分类多样性指数 (Δ^+ 、 Λ^+) 显著下降。初步推断不可持续的捕捞、生境衰退和温度上升等因素导致了玉琢礁珊瑚礁鱼类的更替。研究结果可为玉琢礁的珊瑚礁鱼类资源保护与管理、珊瑚礁生态系统的恢复提供参考。

关键词: 西沙群岛; 珊瑚礁鱼类; 人类扰动; 生境衰退; 演变

中图分类号: S 932.4

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Species composition and succession of coral reef fish in Yuzhuo Reef, Xisha Islands

XIE Hongyu^{1,2}, LIU Yong^{1,2}, ZHAO Jinfa^{1,2}, LI Chunhou^{1,2}, SHI Juan^{1,2}, XIAO Yayuan^{1,2}, WANG Teng^{1,2}

1. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences/Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Observation and Research Field Station of Pearl River Estuary Ecosystem, Guangdong Province/Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, Guangzhou 510300, China
2. Sanya Tropical Fisheries Research Institute/Scientific Observation and Research Station of Xisha Island Reef Fishery Ecosystem of Hainan Province/Key Laboratory of Efficient Utilization and Processing of Marine Fishery Resources of Hainan Province, Sanya 572018, China

Abstract: Yuzhuo Reef is an important atoll in the Xisha Islands, with diverse coral reef ecosystems and rich fish resources. In order to understand the status of coral reef fish resources in Yuzhuo Reef and their evolutionary features, we investigated the fish resources of Yuzhuo Reef in 2023 through methods such as handline fishing, underwater spearing, underwater videography and

收稿日期: 2024-01-09; 修回日期: 2024-03-13

基金项目: 海南省自然科学基金 (323MS124, 322CXTD530); 农业财政专项 (NHZX2024); 广东省基础与应用基础研究重大项目 (2019B030302004-05); 中国水产科学研究院基本科研业务费项目 (2023TD16); 中国水产科学研究院南海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助 (2021SD04, 2019TS28)

作者简介: 谢宏宇 (1997—), 男, 博士研究生, 研究方向为渔业资源。E-mail: Yuhongxie0603@outlook.com

通信作者: 王 腾 (1986—), 男, 副研究员, 博士, 研究方向为海洋鱼类生态学。E-mail: wt3074589@163.com

environmental DNA (eDNA) analysis, identifying 220 fish species in total, of which 111 were discovered through the eDNA method alone. Combining with the historical archival data from the South China Sea Fisheries Research Institute in 2003, we had already recorded a total of 265 fish species in Yuzhuo Reef, which belong to 12 orders, 50 families and 128 genera, with Perciformes species dominating the species composition. The fish community composition was primarily characterized by small-size fish, with the average taxonomic distinctness index (Δ^+) and variation in taxonomic distinctness index (Λ^+) being 56.08 and 122.4, respectively. Similarity analyses show that from 2003 to 2023, the similarity in species composition, dietary habits and body size was either dissimilar or extremely dissimilar. Compared with the historical records, 45 fish species were not observed; particularly large carnivorous fish were most significantly affected by natural and human disturbances. Conversely, the impact on phytophagous fish was relatively small, with significant decline in taxonomic diversity indexes (Δ^+ , Λ^+). It is suggested that unsustainable fishing practices, habitat degradation and rising temperatures have contributed to changes in the fish community structure in Yuzhuo Reef. The findings provide references for the conservation and management of coral reef fish resources and the rehabilitation of coral reef ecosystems in Yuzhuo Reef.

Keywords: Xisha Islands; Coral reef fish; Human disturbance; Habitat decline; Evolution

珊瑚礁是地球上最为复杂和多样化的生态系统之一, 其总初级生产力和生物多样性均超过地球上的其他生态系统^[1], 具有极高的生态与经济价值。在全球范围内, 南海珊瑚礁生物多样性极为丰富, 虽然中国南海的珊瑚礁面积仅占珊瑚三角区珊瑚礁面积的 17%, 却拥有超过 571 种已知的珊瑚礁物种^[2], 约占珊瑚三角区珊瑚总物种数的 94%^[3]。然而, 由于疾病、气旋、气候变暖和海洋酸化等因素的累积影响^[4], 这些珍贵的珊瑚礁正面临严峻的退化威胁, 世界范围内高达 50% 的珊瑚礁已经退化, 在过去十几年中衰减了约 14%^[5]。例如, 在马来西亚沙巴州, 70% 的调查区域都遭到大面积的死珊瑚覆盖, 87% 的珊瑚礁面临着越来越多来自人类活动的威胁^[6]。中国西沙群岛的七连屿及永兴岛的活珊瑚衰退也十分严重, 其存活数量已不足 10%^[7], 珊瑚礁保护迫在眉睫。

珊瑚礁结构的高度复杂性为不同分类群的各种物种提供了庇护所和食物^[8-10], 鱼类作为主要消费者, 对珊瑚礁内的食物网进行下行效应控制, 并在维持生态系统的健康和恢复力方面发挥着重要作用^[11-13]。例如, 顶级掠食性鱼类的捕食作用可控制长棘海星 (*Acanthaster planci*) 和海胆的爆发, 维持珊瑚礁系统的生态平衡^[14-15]。草食性鱼类可以通过摄食珊瑚礁上的藻类, 抑制藻类生长, 为珊瑚提供必要的生长空间, 促进珊瑚恢复^[4,16]。研究表明, 鹦嘴鱼的数量对于珊瑚礁的生长速率具有驱动作用, 对维持珊瑚礁生境具有重要意义^[17]。但珊瑚礁生态系统逐渐受到过度捕捞等其他扰动的影响, 导致其食物网扭曲^[18-19], 许多珊瑚礁已失去吸收气旋等反复自然干扰的能力, 并经历了长期的相变,

退化成以海藻或其他植物物种主导的生态系统^[20-21]。值得注意的是, 近 20 年来, 西沙群岛的鱼类资源呈显著退化趋势, 其中永兴岛、东岛和永乐环礁等岛礁均出现从大型鱼类到小型鱼类、肉食性鱼类到植食性鱼类的演变趋势^[22-24]。因此, 监测珊瑚礁生态系统鱼类组成并分析其演变趋势, 对于珊瑚礁及鱼类资源的恢复尤为重要。

玉琢礁 (111°57'E—112°06'E, 16°19'N—16°22'N) 靠近华光礁, 距离永乐群岛东南面约 10 n mile, 东西向的长度约 7 n mile, 南北宽度约 2.6 n mile。尽管玉琢礁并未发育出岛屿和沙洲, 但其礁缘浪花带却清晰可见, 礁盘上散布着各种形状的珊瑚块。作为西沙群岛中的重要环礁, 玉琢礁拥有多样化的珊瑚礁生态系统和丰富的鱼类资源, 这对于探索海洋生物多样性和生态功能的研究具有深远影响。然而, 目前尚未见关于玉琢礁珊瑚礁的鱼类组成和演变特征的详尽研究。

为掌握玉琢礁珊瑚礁鱼类的资源状况, 本研究于 2023 年采用手钓、潜捕、水下视频和 eDNA 的方法对玉琢礁珊瑚礁鱼类资源进行了全面调查, 结合中国水产科学研究院南海水产研究所 2003 年的历史档案数据, 构建了玉琢礁的珊瑚礁鱼类名录, 对鱼类种类组成、食性和体型大小组成进行整理, 并计算相似性系数及分类多样性指数, 以期深入分析玉琢礁珊瑚礁鱼类的演变特征。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究对中国水产科学研究院南海水产研究所 2003 年玉琢礁的历史档案数据进行整理, 同时结合 2023 年的调查研究, 从而建立玉琢礁珊瑚礁

鱼类名录,两次采样时间均为当年的4—5月。2003年采用的调查方法主要有延绳钓和刺网捕捞,在傍晚下网,次日清晨收网;2023年采用潜水捕捞、手钓、水下视频以及eDNA多种方法相结合的方式,其中eDNA采样深度最深达60 m。潜水捕捞时间一般为20:00—24:00,由渔民在珊瑚礁区进行无选择性的潜水捕捞。水下视频在白天拍摄,有两种拍摄方式:1)在不同水深(5、10和15 m)铺设样带(长50 m),由潜水员从头至尾拍摄;2)由潜水员在水下全面寻找不同鱼类进行拍摄。手钓时间为全天,由钓手在采样船两侧布设鱼钩,全天监控鱼类上钩情况。eDNA样品采集与处理过程:1)使用5 L的采水器在每个采样点采集表、中、底层水样共15 L,保存至已消毒的一次性采样袋中,后置入保温箱中-4℃保存;2)样品运回大船后立即使用真空抽滤设备将水样过滤至直径47 mm、孔径0.2 μm的聚碳酸酯滤膜上,将抽滤后的滤膜放入2 mL冻存管并置于液氮中-80℃保存,每组样品使用相同的设备和程序,在同一天抽滤相同体积的纯水作为阴性对照;3)滤膜送至壹键生物科技有限公司进行测序,将得到的OTU序列与目标基因宏条形码数据库的参考序列进行BLAST(v2.2.31)比对,根据相似度分别设置98%、95%、90%、85%的阈值,以确定种、属、科、目和纲5个分类水平的分类界限。

1.2 鱼类食性划分

采用Sale^[25]提出的鱼类食性分类方法,将鱼类食性划分为植食性(Herbivores)、杂食性(Omnivores)和肉食性(Carnivore)3种主要类别。具体的食性类别通过解剖学分析确定,同时参考Fish-Base数据库和《南海诸岛海域鱼类志》^[26]中的资料,以确保分类的准确性和全面性。

1.3 鱼类个体大小划分

将鱼类个体体型划分为3种规格类别,分别为大型鱼类(≥65 cm)、中型鱼类(35~65 cm)和小型鱼类(<35 cm)^[27]。本研究鱼类的最大全长数据来源于FishBase,其中极少数无法获得最大全长数据的,参考同属鱼类的最大全长值。

1.4 濒危状态

依据国际自然保护联盟(IUCN)的红色名录标准(IUCN Red List: <https://www.iucnredlist.org/>),对鱼类物种濒危状态进行评估,按照IUCN的分类体系,鱼类物种的保护级别从低到高依次划分为9个

等级:未评估(Not evaluated, NE)、数据缺乏(Data deficient, DD)、无危(Least concerned, LC)、近危(Near threatened, NT)、易危(Vulnerable, VU)、濒危(Endangered, EN)、极危(Critically endangered, CR)、野外灭绝(Extinct in the wild, EW)和灭绝(Extinction, EX)。

1.5 数据分析

使用SPSS 24.0软件进行珊瑚礁鱼类最大全长与种类数之间的相关性分析。采用线性函数、指数函数、幂函数、逻辑函数方程进行拟合,并选择具有最大相关系数 R^2 的方程作为拟合方程,分析其相关性特征。同时,通过独立样本 t 检验探究不同食性类型珊瑚礁鱼类最大全长之间的差异显著性,显著性水平 α 为0.05。

采用Primer 5.2软件中的Taxdtest软件包进行分类学多样性指数的计算,包括平均分类差异指数(Δ^+)和分类差异变异指数(Λ^+)^[28]。 Δ^+ 用于衡量物种名录中任意一对物种之间的平均分类距离路径的理论平均值,其特点是不随物种数量的变化而变化; Λ^+ 是 Δ^+ 偏离程度的平均值,揭示物种间路径长度的差异,反映物种组成的亲缘关系分布的均匀性。这种基于分类学地位的多样性指数(Δ^+ 和 Λ^+)相较于传统多样性指标,能更有效地减少由采样方法和栖息地生态类型的自然变化等因素引起的偏差,从而更准确地阐释群落内种间的关系^[29]。

平均分类差异指数(Δ^+)和分类差异变异指数(Λ^+)计算公式为^[29]:

$$\Delta^+ = \frac{\sum \sum_{i < j} w_{ij}}{S(S-1)/2} \quad (1)$$

$$\Lambda^+ = \frac{\sum \sum_{ij} (w_{ij} - \Delta^+)^2}{S(S-1)/2} \quad (2)$$

式中: w_{ij} 为 i 和 j 种类在分类系统树中的路径长度; S 为种类数。

Jaccard相似性系数(J_s)计算公式为^[30]:

$$J_s = \frac{c}{a+b-c} \quad (3)$$

式中: a 、 b 分别为某两个年份的鱼类种类数或者目、科、属的数量; c 为2个年份调查中观察到的共有鱼类种类数或其目、科、属的数量。相似度分为4个等级:极不相似($0 < J_s < 0.25$)、不相似($0.25 \leq J_s < 0.50$)、中等相似($0.50 \leq J_s < 0.75$)和极相似($0.75 \leq J_s < 1.00$)。

珊瑚礁鱼类多样性指数(Coral fish diversity in-

dex, CFDI)^[31]:

$$N=3.39(CFDI)-20.595 \quad (4)$$

式中: N 为预测总物种数; $CFDI$ 为刺尾鱼科、蝴蝶鱼科、隆头鱼科、鹦嘴鱼科、刺盖鱼科和雀鲷科的总物种数。

2 结果

2.1 鱼类种类组成特征

综合本次调查与历史档案数据, 截至目前玉琢礁共发现鱼类 265 种 (图 1, 附录 A, 详见 <http://dx.doi.org/10.12131/20240008> 的资源附件), 隶属于 12 目 50 科 128 属, 其中辐鳍鱼纲 260 种, 软骨鱼纲 5 种。辐鳍鱼纲共记录 10 目, 以鲈形目鱼类

为主 (202 种), 占总种数的 76.23%; 其次是鲉形目和金眼鲷目, 均为 16 种, 各占总种类数的 6.04%; 鳗鲡目 9 种, 占总种类数的 3.04%; 其他目均不超过 5 种。软骨鱼纲共记录 2 目, 包括鲼目 4 种, 占总种类数的 1.51%; 真鲨目 1 种, 占总种类数的 0.37%。玉琢礁珊瑚礁鱼类共记录 50 个科, 其中种类数最多的是隆头鱼科 (31 种); 其次是雀鲷科 (20 种)、鹦嘴鱼科 (19 种)、蝴蝶鱼科 (8 种)、刺尾鱼科 (17 种)、鳗科 (16 种)、鲈科 (12 种), 裸颊鲷科和羊鱼科各 10 种, 其他科均不超过 10 种。这些鱼类共由 128 个属组成, 其中蝴蝶鱼属 (*Chaetodon*) 种类最多 (15 种), 鹦嘴鱼属 (*Scarus*) 次之 (12 种), 其他属均低于 10 种。

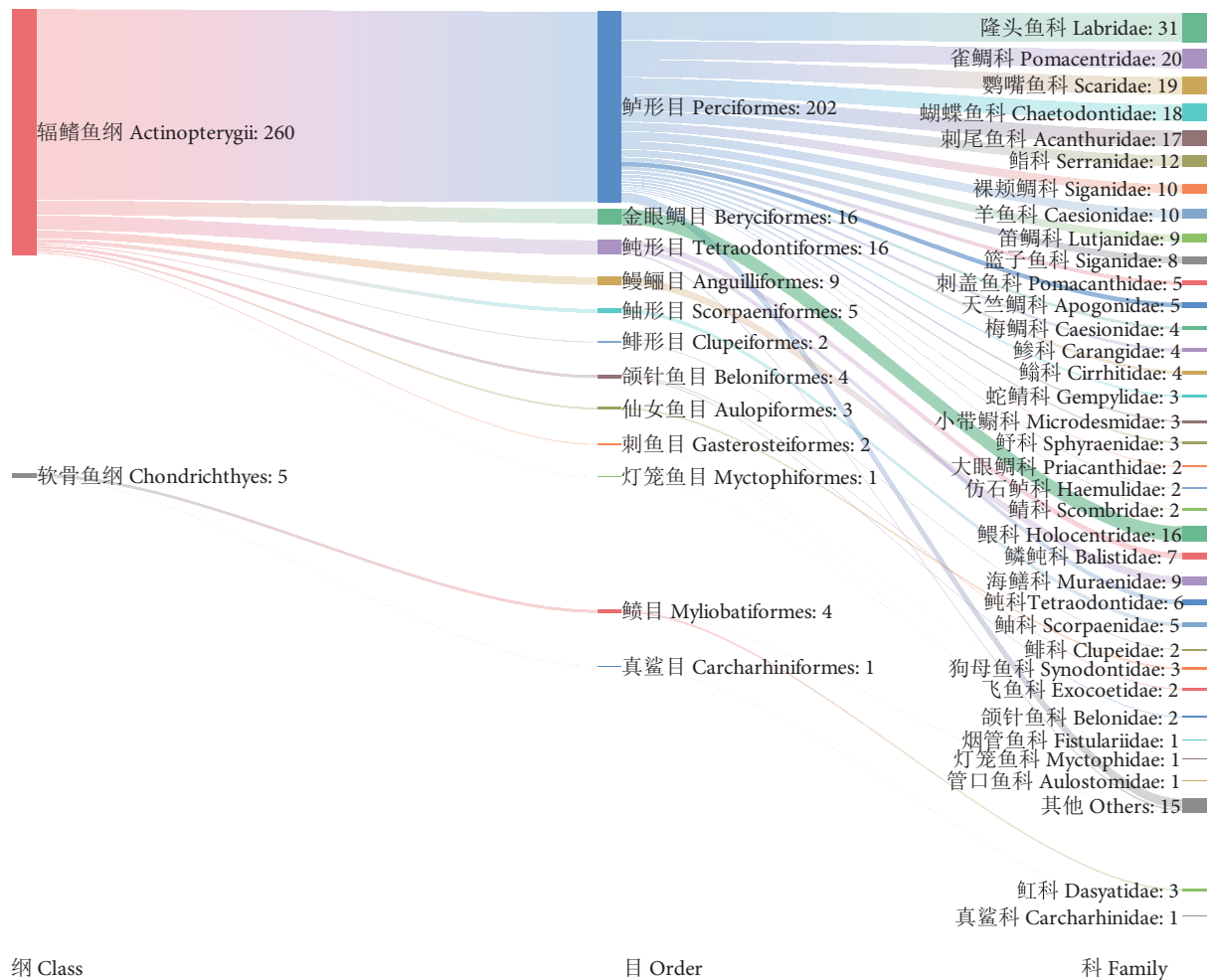


图1 西沙群岛玉琢礁珊瑚礁鱼类物种组成

Fig. 1 Species composition of coral reef fish in Yuzhuo Reef, Xisha Islands

2023 年现场调查共发现鱼类 220 种, 其中 eDNA 方法共发现鱼类 111 种, 对比西沙群岛的历史数据和长期监测结果, 除伯恩斯裸胸鳝 (*Gymnothorax buroensis*)、长尾弯牙海鲷 (*Strophidon sathe*)、黑背圆颌针鱼 (*Tylosurus acus*)、翼髯须唇飞鱼

(*Cheilopogon pinnatibarbus*)、细头燕鲷鱼 (*Cypselurus angusticeps*)、凸颌锯鳞鱼 (*Myripristis berndti*)、格氏锯鳞鱼 (*M. greenfieldi*)、锈眼小体鲱 (*Spratelloides delicatulus*)、银带小体鲱 (*S. gracilis*)、帕尔眶灯鱼 (*Diaphus parri*)、方吻鼻鱼 (*Naso*

mcdadei)、印度洋天竺鲷 (*Jaydia striatodes*)、萨摩亚天竺鲷 (*Nectamia savayensis*)、马氏鳞鳍梅鲷 (*Pterocaesio marri*)、双斑钝鲷 (*Amblycirrhitis bimacula*)、日本银鲈 (*Gerres japonicus*)、条尾刺尻鱼 (*Centropyge fisheri*)、突额鹦嘴鱼 (*S. ovifrons*)、中华马鲛 (*Scomberomorus sinensis*) 和土佐鰺 (*Uranoscopus tosa*) 等 20 种外, 其他物种均在西沙群岛鱼类资源调查中存在记录。此外, 刺尾鱼科、蝴蝶鱼科、隆头鱼科等 6 科的总物种数为 110 种, 根据珊瑚礁鱼类多样性指数 (CFDI) 计算^[31], 预测玉琢礁珊瑚礁鱼类总物种数为 352 种。

2.2 鱼类群落结构特征

玉琢礁珊瑚礁鱼类物种的最大全长范围分布广泛, 6~400 cm 均有分布。将鱼类的最大全长分为 10 cm 间隔的区间, 以区间中值代表最大全长, 并计算各区间内的物种数量, 拟合物种数与最大全长之间的关系曲线。结果表明, 物种数量与其最大全长之间存在指数级的相关性, 且随着最大全长的增加, 物种数量呈递减趋势, 当全长超过 80 cm 时, 物种数量的下降趋势减缓 (图 2)。表明玉琢礁鱼类的最大全长主要集中在 80 cm 以下的区间, 占总物种数的 88.68%, 共计 235 种。

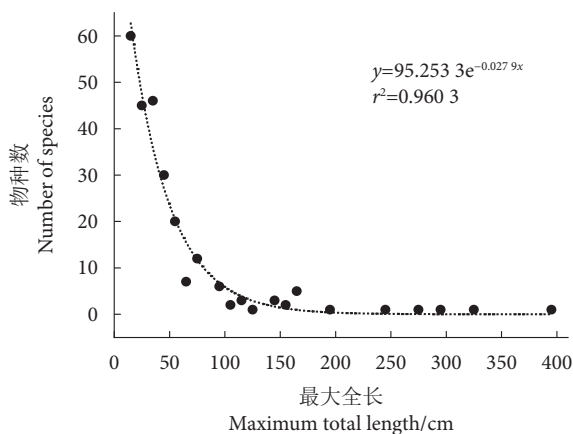


图2 西沙群岛玉琢礁珊瑚礁鱼类的最大全长物种分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of coral reef fish with maximum total length in Yuzhuo Reef, Xisha Islands

玉琢礁鱼类以小型鱼类为主 (133 种), 占总种类数的 50.19%; 其次是中型鱼类 (84 种), 占总种类数的 31.70%; 大型鱼类 48 种, 占总种类数的 18.11%。在鱼类的食性分布方面, 肉食性鱼类的种类数最多 (153 种), 占总种类数的 57.73%; 其次是杂食性鱼类 (67 种), 占总种类数的 25.28%; 植食性鱼类 45 种, 占总种类数的 16.98%。在大型和中

型鱼类群体中, 肉食性鱼类分别占 75.00% 和 61.90%, 居于领先地位; 其次是植食性鱼类, 分别占 16.67% 和 32.14%; 杂食性鱼类的比例最小, 仅为 8.33% 和 5.95%。对于小型鱼类而言, 肉食性鱼类和杂食性鱼类分别占 48.87% 和 43.61%, 植食性鱼类的比例最低 (7.52%, 图 3)。

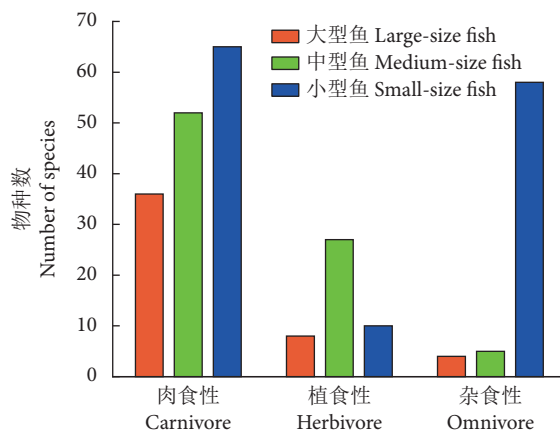


图3 西沙群岛玉琢礁不同大小和食性类型珊瑚礁鱼类分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of coral reef fish with different sizes and feeding habits in Yuzhuo Reef, Xisha Islands

在肉食性鱼类中, 小型鱼类群体的种类数最丰富, 共有 65 种, 约占肉食性鱼类总数的 42.48%; 大型鱼类的种类数最少 (36 种), 占肉食性鱼类总数的 23.53%。植食性鱼类中, 中型鱼类群体的占比最高 (27 种), 达 60.00%。杂食性鱼类中, 小型鱼类群体占比最高 (58 种), 达 86.57% (图 3)。

鱼类的最大全长范围在不同食性中的分布差异显著; 肉食性鱼类个体最大, 最大全长分布范围为 7.84~400.00 cm, 平均为 (63.79 ± 72.88) cm; 杂食性鱼类个体最小, 最大全长分布范围为 6.00~120.00 cm, 平均为 (22.47 ± 19.30) cm; 植食性鱼类最大全长分布范围为 21.00~100.00 cm, 平均为 (47.51 ± 17.78) cm (图 4)。

根据物种名录, 计算得到玉琢礁鱼类 Δ^+ 和 Λ^+ 的理论平均值及 95% 置信漏斗曲线 (图 5-a—5-b)。随时间变化玉琢礁珊瑚礁鱼类的 Δ^+ 为 2003 (56.28) > 2023 (56.08), Λ^+ 为 2003 (141.1) > 2023 (122.4)。从相似度层面来看, 2003 与 2023 年的目、科、属、种的相似性指数分别为 0.58、0.48、0.29、0.13, 不同功能群的相似性均表现为极不相似, 肉食性、植食性和杂食性鱼类分别为 0.12、0.2 和 0.10, 大型、中型和小型鱼类分别为 0.08、0.18 和 0.11。

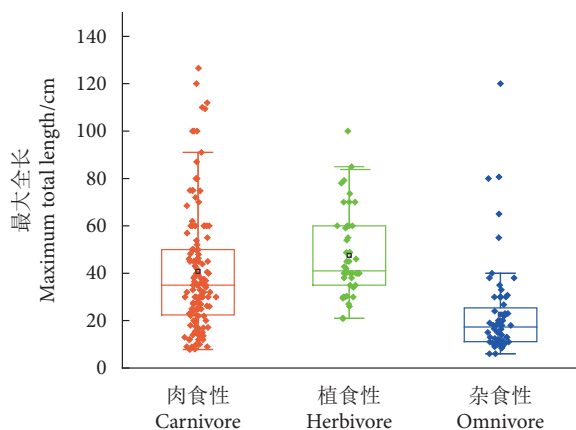


图4 西沙群岛玉琢礁不同食性类型的珊瑚礁鱼类大小特征

Fig. 4 Body size characteristics of coral reef fish with different feeding habits in Yuzhuo Reef, Xisha Islands

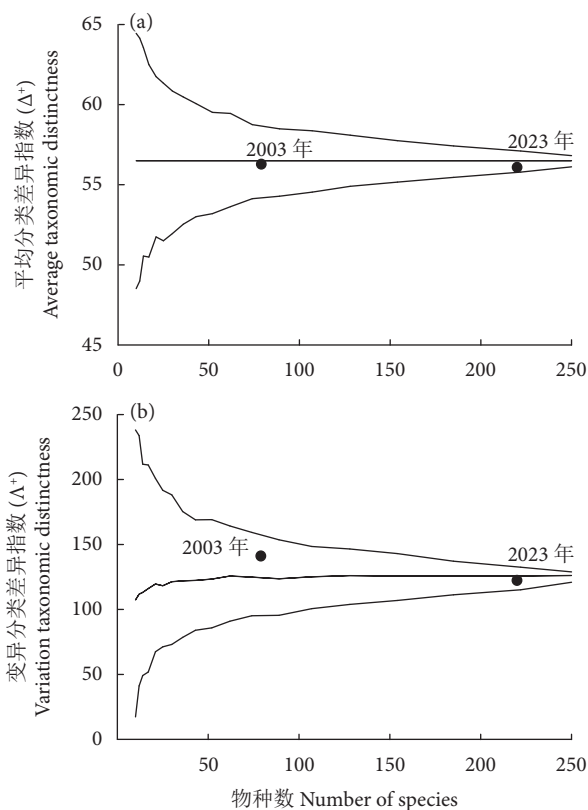


图5 西沙群岛玉琢礁不同时间段分类多样性指数的95%置信区间漏斗图

Fig. 5 Funnel plots of 95% confidence limits for taxonomic diversity indices in Yuzhuo Reef, Xisha Islands at different periods

2.3 未发现鱼类群落结构特征

与历史调查数据进行比较, 本研究共有 45 种鱼类未被监测到, 其中肉食性鱼类最多 (33 种), 占未发现鱼类总数的 73.33%。植食性和杂食性鱼类占比相对较低, 分别占 17.78% (8 种) 和 8.89% (4 种)。本研究未发现的大型鱼类中, 大部分为肉食性鱼类 (9 种), 占大型鱼类的 81.82%, 植食性和

杂食性鱼类均只有 1 种; 未发现的中型鱼类中, 肉食性鱼类同样占主导地位, 有 16 种 (80.00%), 植食性 4 种 (20.00%), 无杂食性鱼类; 未发现的小型鱼类中, 肉食性鱼类也相对较多, 有 8 种 (57.10%), 植食性和杂食性鱼类均为 3 种 (图 6)。此外, 大型鱼类和中型鱼类在其功能群中未发现的比例也较高, 分别占各自类群的 22.9% 和 23.8% (图 7)。值得注意的是, 玉琢礁珊瑚礁鱼类中有 4 种列于 IUCN 红色名录, 其中保护状态为濒危的有 1 种, 为纳氏鰐 (Aetobatus narinari); 近危的有 1 种, 为侧条真鲨 (Carcharhinus amblyrhynchoideis); 易危的有 2 种, 分别是迈氏条尾魮 (Taeniura meyeni) 和糙沙粒魮 (Urogymnus asperrimus), 这些鱼类均为大型肉食性鱼类。

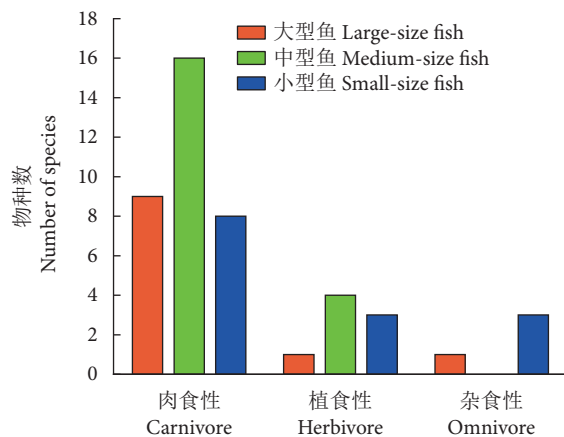


图6 西沙群岛玉琢礁较历史研究未发现的珊瑚礁鱼类个体大小及食性特征

Fig. 6 Historical comparative study on previously undiscovered coral reef fish with different sizes and feeding habits in Yuzhuo Reef, Xisha Islands

3 讨论

3.1 鱼类种类组成特征

玉琢礁的珊瑚礁鱼类物种达 265 种, 超过了涠洲岛 (114 种)^[32]、东岛 (235 种)^[23] 和越南泰国湾的富国岛 (256 种)^[33], 较其他岛屿展现出更高的丰富性。这可能得益于玉琢礁存在潟湖及其珊瑚礁结构的复杂性, 为鱼类提供了丰富的食物来源和庇护所, 利于鱼类的繁殖和生存^[34]。然而, 玉琢礁的物种数仍低于永乐环礁 (336 种)^[24] 和七连屿 (315 种)^[27], 这种差异可能源于不同珊瑚礁在地理和生态构成上存在差别。与玉琢礁单一岛屿的结构相比, 永乐环礁和七连屿均由多个岛屿组成, 因此有更大的珊瑚覆盖面积和更高的结构复杂性, 增加

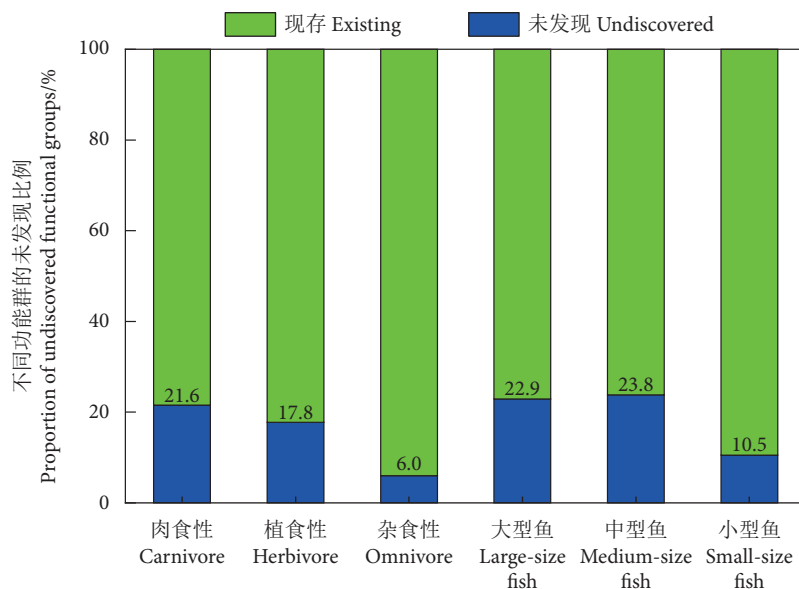


图7 西沙群岛玉琢礁珊瑚礁鱼类各功能群未发现比例

Fig. 7 Proportion of undiscovered functional groups of coral reef fish in Yuzhuo Reef, Xisha Islands

了珊瑚栖息地的多样性和复杂性,为鱼类提供了更广泛的生态位,从而支持更多鱼类物种的生存。此外,根据CFDI预测,玉琢礁鱼类总种类数为352种^[31],其中87个物种尚未被发现,这一结果可能指示这些物种已经消亡或者资源量相对较少,这也初步反映出玉琢礁鱼类种群数量和种类正在经历演变,且需要进一步的调查和保护。在印度-太平洋海域的珊瑚礁鱼类涵盖100多科,其中大多数物种均来自少数的一部分科,通常大多数珊瑚礁鱼类群落由隆头鱼科、鹦嘴鱼科、蝴蝶鱼科等29科组成,这些科构成了全部珊瑚礁鱼类群落的85%~90%^[35]。本研究结果与此结论相吻合,除了拟雀鲷科和海龙科未被监测到,其他科均有发现,且占总物种数的86.42%。这一比例与西沙群岛中其他岛礁存在细微差异,例如七连屿仅未发现小带鲷科,其他科占总物种数的89.52%^[27];东岛未发现金线鱼科、拟雀鲷科、海龙科和小带鲷科,其他科占总物种数的82.13%^[23]。这些差异可能是由于各岛礁之间的地理隔离、水流模式、海洋环境等因素所致,这些因素可能会影响物种的分布和适应性,从而导致不同岛礁上的物种组成和特有性的差异。

3.2 不同体型和食性鱼类的变化

与历史档案数据相比,2023年调查研究显示,在未发现的鱼类中,肉食性鱼类的比例远超其他食性,表明肉食性鱼类可能是受自然与人为干扰影响最大的群体^[36]。然而,珊瑚的物种丰富度与

肉食性鱼类的生物量存在显著正相关关系,这暗示玉琢礁珊瑚生境已经遭到破坏^[37]。研究表明,在过度捕捞的影响下,西沙群岛的永兴岛肉食性鱼类大量衰退,植食性鱼类生物量占比上升,出现肉食性鱼类向植食性更替的现象^[22];同时,银屿珊瑚礁生境的快速退化对植食性鱼类的干扰最小^[37],这与本研究中植食性鱼类受影响的表现一致。并且,在玉琢礁未发现的鱼类中,大中型鱼类比例较高,这与全球范围内近几十年来珊瑚礁鱼类的衰退趋势相符^[38]。例如,西沙群岛中的东岛、永乐环礁均在过度捕捞等人类扰动和气候变化的自然压力下,鱼类群落结构发生了显著变化,大型、肉食性鱼类的比例大幅降低^[23-24]。值得注意的是,本研究记录在IUCN红色名录中的鱼类均为大型肉食性鱼类,且均为软骨鱼类,这也反映了软骨鱼类对栖息地破坏、气候变化和人类扰动等多种压力的适应能力较弱^[39]。在这些负面影响下,全球珊瑚礁鲨鱼和鳐鱼的灭绝风险指数呈持续上升趋势,有近2/3面临灭绝威胁^[40]。此外,本研究对玉琢礁各功能群与历史数据的相似性比较发现,大型鱼类和肉食性鱼类的相似性最低或近最低,这也进一步说明在自然与人为压力下其种群受到了干扰^[41]。

玉琢礁出现这种演变趋势的原因推测有以下几种:1)大型鱼类和肉食性鱼类由于具有较高的经济价值而成为捕捞的主要目标^[42],不可持续的捕捞方式会导致大型鱼类和肉食性鱼类的种群数量迅速减少^[38],并且大型鱼类性成熟晚、性成熟周期

长等特性使其种群的恢复过程十分艰难^[43]。2) 栖息生境衰退。研究表明, 在过去的30年中, 中国大陆及海南岛沿海珊瑚礁经历了珊瑚丰度的急剧下降, 降幅至少80%。在2007—2008年, 西沙群岛珊瑚礁遭受了大规模的长棘海星侵袭, 2009年西沙群岛的珊瑚覆盖率从2005—2006年的65%~70%急剧下降至仅7.93%^[44], 长棘海星的大规模爆发成为导致西沙珊瑚生境衰退的主要原因之一, 珊瑚覆盖的持续丧失和珊瑚礁结构的扁平化将影响珊瑚礁鱼类功能特征的分布和丰度^[45]。3) 气候变化。温度上升、海洋酸化等原因对珊瑚及其鱼类栖息地和食物链产生的负面影响与鱼类小型化有密切联系^[46]。近几十年来, 西沙群岛的气温呈上升趋势^[47], 这可能将对该地区的生态系统造成持续影响。

3.3 鱼类分类多样性特征

鱼类分类学差异性指数可以反映人类或自然因素对环境的扰动^[48-49], 其中 Δ^+ 的变化反映群落中物种多样性的升降, 揭示群落中物种间差异的增减; 而 Λ^+ 则反映群落中不同物种之间在分类学联系上一致性方面的差异^[29], 这种差异可能是环境条件变化或环境所受压力程度的不同所致^[50]。例如, 在西沙群岛永乐环礁的珊瑚礁鱼类研究中, 其珊瑚覆盖度与生境多样性显著降低, 分类多样性也呈现出下降趋势^[24]。另外, 气候变暖及其引起的海面温度升高已被证明会导致海洋物种丰富度下降^[51], 还会对鱼类的繁殖过程产生抑制作用, 且会对幼鱼产生更加明显的影响^[52]。与其他珊瑚礁海域相比, 玉琢礁的 Δ^+ (56.08) 和 Λ^+ (122.4) 均高于七连屿 (54.19 和 112.35)^[53], 说明玉琢礁的鱼类群落中包含的物种差异更大, 并且在分类学上的多样性和一致性方面表现出更大的差异, 也暗示玉琢礁较七连屿所受环境变化与人类扰动的影响较小, 栖息地环境相对良好, 具有更广泛的物种组成和更复杂的生态关系^[54]。玉琢礁珊瑚礁鱼类的 Δ^+ 和 Λ^+ 随时间推移表现出的差异并不大, 但也呈现出下降趋势。此外, 捕捞活动是威胁全球海洋鱼类生物多样性的主要因素^[55], 且已导致超过40个海洋鱼类种群由于过度捕捞而灭绝^[56]。生物多样性影响着生命系统应对环境变化的能力, 是生态系统功能的核心, 环境恶化造成的生物多样性衰退, 或将威胁人类健康与利益^[57]。因此, 减少过度捕捞、对栖息地进行保护与恢复以及进行标准化和长期的研究

调查, 以监测鱼类物种丰富度和大小组成的变化, 对于了解和保护珊瑚礁生态系统至关重要。

4 结论

本研究揭示了玉琢礁鱼类群落的组成特征和演变趋势, 构建了较详尽的玉琢礁珊瑚礁鱼类名录。玉琢礁鱼类资源的演变呈现出对人类扰动和环境变化的敏感性, 在不可持续的捕捞、生境衰退和温度上升等因素影响下, 大型肉食性鱼类的消亡以及生物多样性的衰退明显。本研究填补了西沙群岛玉琢礁珊瑚礁鱼类组成和演变特征的研究空白, 为保护和管理玉琢礁珊瑚礁鱼类资源提供了重要参考。

参考文献:

- [1] CONNELL J H. Diversity in tropical rain forests and coral reefs[J]. Science, 1978, 199(4335): 1302-1310.
- [2] HUANG D, LICUANAN W Y, HOEKSEMA B W, et al. Extraordinary diversity of reef corals in the South China Sea[J]. Mar Biodivers, 2014, 45(2): 157-168.
- [3] VERON J E N, DEVANTIER L M, TURAK E, et al. The coral triangle[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010: 47-55.
- [4] BOSTRÖM-EINARSSON L, BABCOCK R C, BAYRAKTAROV E, et al. Coral restoration: a systematic review of current methods, successes, failures and future directions[J]. PLoS One, 2020, 15(1): e0226631.
- [5] BURKE L, SELIG E, SPALDING M, et al. Reefs at risk in Southeast Asia[M]. Washington, D.C.: World Resources Institute, 2002: 2-10.
- [6] 李元超, 陈石泉, 郑新庆, 等. 永兴岛及七连屿造礁石珊瑚近10年变化分析[J]. 海洋学报, 2018, 40(8): 97-109.
- [7] HUGHES T P, BARNES M L, BELLWOOD D R, et al. Coral reefs in the Anthropocene[J]. Nature, 2017, 546(7656): 82-90.
- [8] ANDERSON G R V, EHRLICH A H, EHRLICH P R, et al. The community structure of coral reef fishes[J]. Am Nat, 1981, 117(4): 476-495.
- [9] ÖHMAN M C, RAJASURIYA A. Relationships between habitat structure and fish communities on coral[J]. Environ Biol Fish, 1998, 53: 19-31.
- [10] CHITTARO P M. Fish-habitat associations across multiple spatial scales[J]. Coral Reefs, 2004, 23(2): 235-244.
- [11] ARIAS-GONZÁLEZ J E, DONE T J, PAGE C A, et al. Towards a reefscape ecology: relating biomass and trophic structure of fish assemblages to habitat at Davies Reef, Australia[J]. Mar Ecol Prog Ser, 2006, 320: 29-41.
- [12] CÁCERES I, ORTIZ M, CUPUL-MAGANA A L, et al. Trophic models and short-term simulations for the coral reefs of Cayos Cochinos and Media Luna (Honduras): a comparative network

- analysis, ecosystem development, resilience, and fishery[J]. *Hydrobiologia*, 2015, 770: 209-224.
- [13] AGUILAR-MEDRANO R, CALDERON-AGUILERA L E. Redundancy and diversity of functional reef fish groups of the Mexican Eastern Pacific[J]. *Mar Ecol*, 2016, 37: 119-133.
- [14] MCCLANAHAN T R, MUTHIGA N A. Changes in Kenyan coral reef community structure and function due to exploitation[J]. *Hydrobiologia*, 1988, 166(3): 269-276.
- [15] KROON F J, LEFÈVRE C D, DOYLE J R, et al. DNA-based identification of predators of the corallivorous crown-of-thorns starfish (*Acanthaster cf. solaris*) from fish faeces and gut contents[J]. *Sci Rep*, 2020, 10: 8184.
- [16] EDWARDS C B, FRIEDLANDER A M, GREEN A G, et al. Global assessment of the status of coral reef herbivorous fishes: evidence for fishing effects[J]. *Proc R Soc B*, 2014, 281: 20131835.
- [17] CRAMER K L, O'DEA A, CLARK T R, et al. Prehistorical and historical declines in Caribbean coral reef accretion rates driven by loss of parrotfish[J]. *Nat Commun*, 2017, 8: 14160.
- [18] HUGHES T P, BAIRD A H, BELLWOOD D R, et al. Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs[J]. *Science*, 2003, 301(5635): 929-933.
- [19] HUGHES T P, RODRIGUES M J, BELLWOOD D R, et al. Phase shifts, herbivory, and the resilience of coral reefs to climate change[J]. *Curr Biol*, 2007, 17(4): 360-365.
- [20] WILSON S K, FISHER R, PRATCHETT M S, et al. Exploitation and habitat degradation as agents of change within coral reef fish communities[J]. *Glob Change Biol*, 2008, 14(12): 2796-2809.
- [21] NORSTRÖM A, NYSTRÖM M, LOKRANTZ J, et al. Alternative states on coral reefs: beyond coral-macroalgal phase shifts[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 2009, 376: 295-306.
- [22] 王腾, 刘永, 李纯厚, 等. 永兴岛附近海域珊瑚礁鱼类群落结构特征[J]. *水生生物学报*, 2023, 47(4): 674-683.
- [23] 王腾, 李纯厚, 赵金发, 等. 西沙东岛珊瑚礁鱼类种类组成特征与演变[J]. *水生生物学报*, 2023, 47(9): 1456-1463.
- [24] ZHAO J F, LI C H, WANG T, et al. Composition and long-term variation characteristics of coral reef fish species in Yongle Atoll, Xisha Islands, China[J]. *Biology*, 2023, 12(8): 1062.
- [25] SALE P F. The ecology of fishes on coral reefs[M]. California: Academic Press, 1991: 47-51.
- [26] 国家水产总局南海水产研究所, 厦门水产学院, 中国科学院海洋研究所, 等. 南海诸岛海域鱼类志[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 1-573.
- [27] 王腾, 刘永, 全秋梅, 等. 七连屿珊瑚礁鱼类种类组成特征分析[J]. *中国水产科学*, 2022, 29(1): 102-117.
- [28] MOUILLOT D, LAUNE J, TOMASINI J A, et al. Assessment of coastal lagoon quality with taxonomic diversity indices of fish, zoobenthos and macrophyte communities[J]. *Hydrobiologia*, 2005, 550: 121-130.
- [29] CLARKE K, WARWICK R. A further biodiversity index applicable to species lists: variation in taxonomic distinctness[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 2001, 216: 265-278.
- [30] ZINTZEN V, ANDERSON M J, ROBERTS C D, et al. Increasing variation in taxonomic distinctness reveals clusters of specialists in the deep sea[J]. *Ecography*, 2011, 34(2): 306-317.
- [31] ALLEN G R. Reef and shore fishes of Milne Bay Province, Papua New Guinea[C]//WERNER T B, ALLEN G R. A rapid biodiversity assessment of the coral reefs of Milne Bay Province, Papua New Guinea. RAP Working Papers 11, Washington, D.C.: Conservation International, 1988: 39-49, 67-107.
- [32] 邹琦, 吴志强, 黄亮亮, 等. 广西涠洲岛珊瑚礁海域鱼类物种组成的调查分析[J]. *南方农业学报*, 2020, 51(1): 1-10.
- [33] van NGUYEN L, MAI D X. Reef fish fauna in the coastal waters of Vietnam[J]. *Mar Biodivers*, 2020, 50: 100.
- [34] KOMYAKOVA V, JONES G P, MUNDAY P L. Strong effects of coral species on the diversity and structure of reef fish communities: a multi-scale analysis[J]. *PLoS One*, 2018, 13(8): e0202206.
- [35] ALLEN G R. Indo-Pacific coral-reef fishes as indicators of conservation hotspots[C]//MOOSA M K, SOEMODIHARDJO S, SOEGIARTO A, et al. Proceedings of the Ninth International Coral Reef Symposium, 23-27 October 2000, Bali, Indonesia, 2002(2): 921-926.
- [36] KOESTER A, GORDÓ-VILASECA C, BUNBURY N, et al. Impacts of coral bleaching on reef fish abundance, biomass and assemblage structure at remote Aldabra Atoll, Seychelles: insights from two survey methods[J]. *Front Mar Sci*, 2023, 10: 1230717.
- [37] 雷明凤, 余克服, 廖芝衡, 等. 西沙群岛银屿珊瑚礁的生态快速退化及其对鱼类的影响[J]. *热带海洋学报*, 2024, 43(3): 87-99.
- [38] COCHRAN K J, BOKUNIEWICZ H J, YAGER P L. Encyclopedia of ocean sciences[M]. 3rd ed. Cambridge: Academic Press, 2019: 7.
- [39] CHIN A, TOBIN A, SIMPFENDORFER C, et al. Reef sharks and inshore habitats: patterns of occurrence and implications for vulnerability[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 2012, 460: 115-125.
- [40] SHERMAN C S, SIMPFENDORFER C A, PACOUREAU N, et al. Half a century of rising extinction risk of coral reef sharks and rays[J]. *Nat Commun*, 2023, 14: 15.
- [41] MCLEAN M, STUART-SMITH R D, VILLÉGER S, et al. Trait similarity in reef fish faunas across the world's oceans[J]. *Proc Nat Acad Sci*, 2021, 118(12): e2012318118.
- [42] SHIN Y J, ROCHET M J, JENNINGS S, et al. Using size-based indicators to evaluate the ecosystem effects of fishing[J]. *ICES J Mar Sci*, 2005, 62(3): 384-396.
- [43] CARDILLO M, MACE G M, JONES K E, et al. Multiple causes of high extinction risk in large mammal species[J]. *Science*, 2005, 309(5738): 1239-1241.
- [44] HUGHES T P, KERRY J T, ÁLVAREZ-NORIEGA M, et al. Global warming and recurrent mass bleaching of corals[J]. *Nature*, 2017, 543(7645): 373-377.
- [45] RICHARDSON L E, GRAHAM N A J, PRATCHETT M S, et al.

- Structural complexity mediates functional structure of reef fish assemblages among coral habitats[J]. *Environ Biol Fish*, 2017, 100(3): 193-207.
- [46] 李嘉琪, 白爱娟, 蔡亲波. 西沙群岛和涠洲岛气候变化特征及其与近岸陆地的对比[J]. *热带地理*, 2018, 38(1): 72-81.
- [47] MUNDAY P L, JONES G P, PRATCHETT M S, et al. Climate change and the future for coral reef fishes[J]. *Fish Fish*, 2008, 9(3): 261-285.
- [48] HALL S, GREENSTREET S. Taxonomic distinctness and diversity measures: responses in marine fish communities[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1998, 166: 227-229.
- [49] ROGERS S I, CLARKE K R, REYNOLDS J D. The taxonomic distinctness of coastal bottom-dwelling fish communities of the Northeast Atlantic[J]. *J Anim Ecol*, 1999, 68(4): 769-782.
- [50] CAMPBELL N, NEAT F, BURNS F, et al. Species richness, taxonomic diversity, and taxonomic distinctness of the deep-water demersal fish community on the Northeast Atlantic continental slope (ICES Subdivision VIa)[J]. *ICES J Mar Sci*, 2010, 68(2): 365-376.
- [51] CHAUDHARY C, RICHARDSON A J, SCHOEMAN D S, et al. Global warming is causing a more pronounced dip in marine species richness around the equator[J]. *Proc Natl Acad Sci*, 2021, 118(15): e2015094118.
- [52] PANKHURST N W, MUNDAY P L. Effects of climate change on fish reproduction and early life history stages[J]. *Mar Freshw Res*, 2011, 62(9): 1015.
- [53] 李媛洁, 陈作志, 张俊, 等. 西沙群岛七连屿礁栖鱼类物种和分类多样性[J]. *中国水产科学*, 2020, 27(7): 815-823.
- [54] JIANG X M, PAN B Z, SUN Z W, et al. Application of taxonomic distinctness indices of fish assemblages for assessing effects of river-lake disconnection and eutrophication in floodplain lakes[J]. *Ecol Indic*, 2020, 110: 105955.
- [55] DÍAZ S, FARGIONE J, CHAPIN F S, et al. Biodiversity loss threatens human well-being[J]. *PLoS Biol*, 2006, 4(8): e277.
- [56] DULVY N K, SADOVY Y, REYNOLDS J D. Extinction vulnerability in marine populations[J]. *Fish Fish*, 2003, 4(1): 25-64.
- [57] HIDDINK J G, MACKENZIE B R, RIJNSDORP A, et al. Importance of fish biodiversity for the management of fisheries and ecosystems[J]. *Fish Res*, 2008, 90(1/2/3): 6-8.