

文章编号: 1674-7054(2021)02-0261-10



潜水旅游对珊瑚礁生态系统影响研究的进展

张 瑜¹, 任瑜潇¹, 刘相波¹, 朱 铭¹, 王爱民^{1,2}, 李秀保^{1,2}

(1. 海南大学 海洋学院, 海口 570228; 2. 海南大学 南海海洋资源利用国家重点实验室, 海口 570228)

摘要: 早期潜水活动曾被认为是一种经济价值高且对珊瑚礁影响较小的生态旅游项目, 但随着潜水旅游逐渐盛行, 诸多研究结果表明, 全世界潜水区的珊瑚礁均出现了不同程度的退化, 一些热门潜水旅游区每年接纳的游客数量甚至远超出珊瑚礁的生态承受极限。笔者对与珊瑚礁生态系统与潜水旅游承载能力相关的研究结果进行了统计分析, 总结了潜水活动影响珊瑚礁的主要因素, 归纳了其对珊瑚、珊瑚礁鱼类、底栖生物群落及珊瑚礁生态系统造成的影响。建议未来可将室内模拟实验与野外宏观数据相结合, 建立潜水活动对珊瑚影响程度的评价指标, 明确不同珊瑚礁区对于潜水等水下娱乐项目的承载能力, 并加强潜水活动对珊瑚礁生态系统的影响研究。

关键词: 珊瑚礁; 珊瑚保护; 潜水旅游; 人类活动; 生态承载力

中图分类号: Q 178.53 **文献标志码:** A

引用格式: 张瑜, 任瑜潇, 刘相波, 等. 潜水旅游对珊瑚礁生态系统影响研究的进展 [J]. 热带生物学报, 2021, 12(2): 261–270. DOI: [10.15886/j.cnki.rdsxb.2021.02.016](https://doi.org/10.15886/j.cnki.rdsxb.2021.02.016)

有关潜水旅游对珊瑚礁影响的研究始于 20 世纪 80 年代。早期研究认为, 与以商业为目的捕捞生物和采集珊瑚等活动相比, 休闲潜水是经济效益高且对珊瑚礁影响较小的海洋生态旅游项目^[1]。TALGE 虽然发现了美国佛罗里达州(Florida)的潜水员每周会直接接触该地 4%~6% 的活珊瑚, 但在当时认为这种行为不会对珊瑚造成永久性伤害^[2]。然而随着各地潜水活动强度的增加^[3], 越来越多研究表明, 超过生态承受能力的潜水活动和其他水下娱乐项目会给珊瑚带来严重影响^[4~7], 且受损珊瑚的比例与潜水频率呈显著的正相关^[8~9]。近年来, 全球潜水区的珊瑚礁出现不同程度的退化: 在加勒比海、红海、澳大利亚大堡礁、印度西海岸和马来西亚热浪岛(Redang)、巴雅岛(Payar)等高强度潜水地点的活珊瑚覆盖率下降, 珊瑚受磨损痕迹明显, 且出现大量的珊瑚断枝^[10~12]。红海超过 50% 的珊瑚群落因潜水项目开发和其他污染而出现大面积白化^[4], 特别是其北部潜水区埃拉特(Eilat)因每年有超过 25 万次的潜水活动, 导致该地珊瑚受损尤为严重。而佛罗里达州的珊瑚礁区作为全球热门潜水胜地^[13], 随着游客数量的逐年增加, 该地超过 80% 的珊瑚群落受到破坏, 高频率潜水地点的活珊瑚覆盖率甚至降到 11% 以下^[14]。

各地潜水旅游区每年接纳的游客数量远远超出预估的珊瑚礁承载能力^[15]。SALM 认为潜水区的生态承载力可以用珊瑚礁不出现明显退化时每年可接待的游客数量来表示^[16], 后人在研究中大多采用了该衡量方法。HAWKINS 和 ROBERTS 发现潜水员对珊瑚礁造成的影响与潜水强度之间的关系可能呈 J 型或 S 型曲线^[17]: J 型曲线, 即当潜水活动强度较低时, 对珊瑚礁造成的负面影响不大, 然而一旦超过临界水平, 影响程度将迅速上升; S 型曲线, 即受损的珊瑚群落数量先呈指数增长, 之后珊瑚礁生态系统将长

收稿日期: 2020-09-20 修回日期: 2020-10-23

基金项目: 海南省重点研发项目(ZDYF2020177); 国家自然科学基金资助项目(42076108); 2020 年海南大学大学生创新创业训练计划项目; 2020 年海南大学海洋学院本科生创新实验课题项目; 海南大学引进人才启动项目 [KYQD(ZR)1805]

第一作者: 张瑜(2000-), 女, 海南大学海洋学院 2018 级本科生. E-mail: 20182115310055@hainanu.edu.cn

通信作者: 李秀保(1980-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 珊瑚礁的保育与修复. E-mail: xiubaoli@hainanu.edu.cn

期维持不良状态。

通过视频样带分析,研究者建立了潜水活动强度与珊瑚覆盖率之间的负相关关系,从而将澳大利亚东部、博奈尔岛(Bonaire)、埃拉特、索德瓦纳湾(Sodwana Bay)和圣卢西亚(St. Lucia)等潜水区的生态承载力确定为每年最多接待4 000~7 000名游客^[4,18]。也有研究者通过建立潜水游客人数与珊瑚受损率之间的曲线关系,将生态承载极限认定为珊瑚受损害程度显著增加的转折点。SCHLEYER 和 TOMALIN 认为当索德瓦纳湾每年承受7 000次潜水活动时,珊瑚受损概率增加20%和10%的可能性分别为25%和40%;倘若每年发生10 000次潜水活动,将导致受损概率增加相同比例的可能性提升至45%和70%,因此认为该地每年最多接纳7 000名左右的潜水游客^[18]。ZHANG 通过建立马来西亚马布岛(Mabul)潜水游客数量与石珊瑚破损失率之间的函数关系,认为若该地每年接待15 600~16 800名潜水游客将有利于珊瑚礁保护^[19]。此外,有研究结果表明,当受到游客破坏的石珊瑚数量超过该区域珊瑚总量的4%时,就需要加强对珊瑚礁区的管理和维护。

1 潜水旅游的影响因素

潜水旅游影响珊瑚的因素主要有3方面:(1)潜水游客的身体部位、潜水设备与珊瑚接触^[20]以及船体抛锚^[21]等破坏性行为会直接造成珊瑚骨骼断裂和组织磨损^[10,14];(2)近岸旅游开发导致大量污染物排放,海水营养盐(主要是铵氮)含量上升,影响珊瑚生长状况^[22]。WIELGUS(2004)发现石珊瑚群体的死亡率因环境中总有机氮(Total Organic Nitrogen)含量上升而显著增加^[23]。(3)潜水过程中容易用脚蹼搅动海底沉积物^[4],导致泥沙沉积速率和水体悬浮颗粒物含量改变;同时,沉积物的再悬浮作用会因人类活动增多而显著加强^[24]。马来西亚丹绒端潜水旅游区(Tanjung Tuan)因泥沙沉积物含量高,导致活珊瑚覆盖率较低^[11]。普遍认为,水体悬浮颗粒物增加可能是潜水活动抑制珊瑚生长的直接因素,另一因素是游客在潜水过程中容易接触珊瑚等较敏感脆弱的海洋生物^[25],这2种效应的结合成为潜水活动破坏珊瑚礁生态系统的主要原因^[26]。

1.1 潜水游客的行为 通过水下跟踪和视频分析,研究者发现潜水游客的脚蹼和潜水设备常常会接触珊瑚,少数游客甚至在礁石上行走、跪坐、站立和跳跃。有研究报告显示,潜水员接触珊瑚的概率大约在71%~97%之间^[27],且脚蹼接触是频率最高、对珊瑚伤害最大的接触行为^[28]。在圣卢西亚潜水区,有81.4%的潜水游客被记录到用脚蹼接触珊瑚的行为^[3]。其次,由于潜水游客在水下难以控制身体平衡,从而与珊瑚发生碰撞^[3,12,14,20]。持续的人为触碰会影响珊瑚群落的生长:一方面,过多的触碰会造成珊瑚骨骼断裂和组织磨损。印度西海岸潜水区珊瑚的骨骼损伤率从2016年的4.83%上升到2019年的11.58%,4年累计骨骼损伤率高达33.1%^[12]。另一方面,脚蹼扰动海底沉积物^[4],造成水体悬浮颗粒物含量上升,珊瑚会因环境因子的改变而使生长受到抑制。BARKER(2004)发现在圣卢西亚的潜水活动中扰动海底沉积物的概率为49.0%,其中有90.8%的可能性直接导致礁区悬浮颗粒物增加^[3]。

此外,是否使用相机和佩戴手套、是否有潜水经验、是否在潜水前接受过培训、潜水过程中是否有潜水教练的指导、选择潜水的地点(岸边潜水或是船潜)和时间(白天或夜间)等因素都与潜水游客的行为以及接触珊瑚的频率有关^[29]。投喂珊瑚礁鱼类的行为一方面可导致礁区营养盐含量和营养元素比例发生改变,促使珊瑚礁退化^[30];另一方面,吸引大量小型鱼类在珊瑚礁区进食,会间接导致鲨鱼等大型肉食性鱼类进入礁区,大大加剧了碰撞破坏珊瑚的可能性。

1.2 营养盐含量的增加 由于近岸旅游开发而向海洋排放大量污染物,水体中氧化氮、有机氮、无机氮浓度的升高会对珊瑚生理造成负面影响:氧化氮(oxidized nitrogen)如硝酸盐含量的上升会抑制珊瑚骨骼生长^[31],降低潜水区珊瑚覆盖率、物种多样性和虫黄藻密度^[32~33];总有机氮浓度较高($0.4\sim0.6\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)区域的活珊瑚覆盖率和每平方米的珊瑚丰度较低、死亡率较高^[23];溶解无机氮(DIN)浓度的升高与大堡礁近岸珊瑚白化温度阈值的降低有关^[34]。人类活动可改变水体营养元素之间的浓度比例:当环境中含有过量溶解无机氮时,虫黄藻细胞从外界获取的磷酸盐相对较少,从而出现营养失衡现象,此时珊瑚最大光

量子效率(F_v/F_m)降低,反映出珊瑚对于温度和光照变化的敏感性增加^[32]。此外,海水氮、磷含量的持续升高还会促进大型藻类生长^[35~36],与珊瑚竞争基底。

然而,近年来“水体营养盐含量上升是珊瑚礁白化原因”的主流观点受到了挑战,几项有关营养盐胁迫的室内实验均没有发现其对珊瑚生理存在明显的负面作用^[37],有分析认为可能是高营养盐海水中珊瑚和大型藻类之间复杂的相互作用影响了珊瑚的生长^[38]。

1.3 沉积物的再悬浮 潜水游客容易用脚蹼扰动海底沉积物,使得潜水区悬浮颗粒物增加。WIELGUS(2004)发现埃拉特密集潜水区的悬浮物含量是离岸距离、深度均相同的对照区的两倍^[23]。被搅动的海底沉积物一方面会覆盖在珊瑚表面,抑制珊瑚正常的呼吸作用;另一方面会加剧沉积物的再悬浮作用,造成礁区水体浊度升高^[24]。水体悬浮颗粒物的增加会阻止珊瑚幼虫的定居和补充,从而抑制珊瑚繁殖^[39],并影响成年珊瑚群体的正常生长^[40];水体中存在的大量悬浮物降低了光透射率,导致虫黄藻的光合能力降低;此外,珊瑚需要消耗大量能量来清除落在其表面的沉积物^[41],导致用于生长和繁殖等生理活动的能量减少,出现白化和死亡现象^[42]。

2 潜水旅游对珊瑚礁生态系统的影响

2.1 潜水旅游对珊瑚群落的主要影响 视频样带分析结果表明,持续的高强度潜水活动容易使珊瑚发生骨骼断裂与组织磨损,甚至增加群体患病率、改变群落的组成结构。

2.1.1 潜水活动导致珊瑚骨骼断裂与组织磨损 潜水员身体部位、潜水设备与珊瑚的频繁碰撞容易使珊瑚群落发生大规模的骨骼断裂和组织磨损^[43]。骨骼断裂是指珊瑚骨架发生断裂,而组织磨损则为珊瑚组织因受到损伤而暴露在外^[4,10,18]。不同种类的珊瑚往往出现不同类型的损伤情况:ZAKAI(2002)观察到埃拉特的分枝状珊瑚存在以骨骼断裂为主的损伤情况,而块状珊瑚则较多地出现组织磨损现象^[4]。珊瑚在受到损伤时,会分泌大量粘液,粘液中存在的微生物使珊瑚更易患病;同时,还会促进大型藻类生长,导致潜水区的海洋捕食者增加,珊瑚在空间竞争中处于不利地位^[44];甚至可能阻碍珊瑚生长和繁殖,使之对水体温度和氮含量的变化异常敏感,难以从海底风暴、温度升高等胁迫条件或自然压力下恢复^[45]。

骨骼损伤会促进与珊瑚疾病相关的微生物生长,从而降低能够促进组织再生的珊瑚免疫功能^[46]。Page 和 Willis(2008)发现因高强度人类活动造成的珊瑚骨骼损伤,使骨骼侵蚀带疾病的病原体——纤毛虫形成致密带状聚集体的能力大大增强,致使大堡礁珊瑚群落平均每天发生长达 0.3 cm 的组织损失^[47]。LAMB(2014)的研究结果也证明了组织损伤和骨骼侵蚀带疾病之间存在明显联系,组织损伤为病原体和纤毛虫的入侵提供了主要场所^[7]。

2.1.2 潜水活动使珊瑚患病率增加 珊瑚疾病与高频率的潜水旅游活动密切相关^[48]。游客对珊瑚群落造成的直接破坏和因潜水带来的沉积物再悬浮作用对珊瑚的影响可能并不明显,但通过与因旅游开发造成的水体污染相互作用后,会削弱珊瑚抵抗微生物侵害的能力或是间接增加病原体的毒性^[49],从而提高潜水旅游区的珊瑚患病率。LAMB 发现泰国涛岛(Koh Tao)低强度潜水地点的珊瑚健康率(79%)远高于密集潜水区(45%),且密集潜水区的骨骼侵蚀带病、白色综合症和黑带病等多种珊瑚疾病的患病率均显著的高于低强度潜水区。其中,因沉积物覆盖导致的珊瑚疾病发生率最高,且被证明与白色综合症密切相关^[7],这可能是因为光照强度较低的潜水区水体以及覆盖在珊瑚表面的沉积物为厌氧微生物提供了良好的生长繁殖环境。当潜水活动扰动海底沉积物时,悬浮颗粒物既可能成为病原体或是疾病传播媒介,也可以通过对珊瑚宿主施加压力而增加其患病的可能性^[50]。目前已有证据支持前者观点:在经抗生素处理后,因沉积物积累而引发的珊瑚疾病减少,有益微生物的生长率提升了 10 倍^[51]。至于沉积物的积累究竟如何导致珊瑚群落患病,尚待进一步研究。

潜水活动还会造成海绵过度生长或使珊瑚发生异常的色素积累现象,二者均被证明是由珊瑚疾病导致。水体营养盐含量和浊度的增加有利于珊瑚疾病微生物和底栖滤食性海绵的生长,从而抑制珊瑚的正常生理过程。对比加勒比群岛(Caribbean)排放未处理污水的海岸与 1 km 外的对照点后发现,前者生长

在圆菊珊瑚(*Montastrea cavernosa*)上的海绵生物量增加了5倍,细菌生物量增加了6倍^[52]。珊瑚组织的色素积累现象,事实上是一种免疫反应^[53]。珊瑚组织中含有较高含量的黑色素,这是无脊椎动物先天免疫的重要组成部分,能起到防御异物的作用^[54]。因此,密集潜水区珊瑚色素含量的升高可能是其对于多种环境因子改变而引发的免疫反应,如外来病原体入侵或沉积物积累等。

2.1.3 潜水活动对珊瑚群落组成的改变 潜水活动对于不同形状、不同种属珊瑚的影响程度不同。多数研究表明,比起块状珊瑚,分枝状珊瑚更容易因游客的频繁触碰而造成骨骼损伤,从而导致潜水区分枝珊瑚的覆盖率和物种多样性大大降低^[55]。AU在香港海域发现的81株断裂的珊瑚中,分枝状珊瑚(鹿角珊瑚属 *Acropora*)和盘状珊瑚(蔷薇珊瑚属 *Montipora*、牡丹珊瑚属 *Pavona* 和叶状珊瑚属 *Lithophyllum*)各占44%,而块状珊瑚(角蜂巢珊瑚属 *Favites*, 扁脑珊瑚属 *Platygyra* 和小星珊瑚属 *Leptastrea*)仅占12%^[8]。一方面是因为分枝状结构脆弱,抵抗外力的能力较弱^[25,29];另一方面是因为大部分分枝状珊瑚(如鹿角珊瑚)对营养盐和沉积物含量的增加较敏感^[56],而石芝珊瑚属(*Fungia*)、滨珊瑚属(*Porites*)及其他块状珊瑚抵抗水体污染的能力更强^[8,11]。一些珊瑚类群如石芝珊瑚清除表面沉积物的能力相对较强,但若长时间处于浊度较高的水体环境中也会因能量的过分损失而白化死亡^[57]。因此,潜水区的块状珊瑚和珊瑚中的机会种常常会代替分枝状珊瑚占据优势地位^[8]:在中国大亚湾原本占优势的分枝状霜鹿角珊瑚(*Acropora pruinosa*)被块状的秘密角蜂巢珊瑚(*Favites abdita*)所取代^[58];法国茉莉雅岛潜水区(Moorea)原有优势种分枝状鹿角珊瑚则被其他机会种所替代^[59]。潜水旅游区还可能出现较多的抗病珊瑚类群,如菌珊瑚科(Agariciidae)、蜂巢珊瑚科(Faviidae)、石芝珊瑚科(Fungiidae)和裸肋珊瑚科(Merulinidae)等^[7],反映出珊瑚群落对于胁迫环境的适应和调整。然而,有些研究者得出了与上述不同的结论:认为珊瑚受损伤的概率与形状无关或是块状珊瑚更易发生骨骼断裂^[10,20]。KRIEGER发现佛罗里达州不同类型珊瑚受损伤的概率一致^[14],可能是由于该地发现的分枝状珊瑚主要是易形成密集群体的滨珊瑚属,而非前人研究中大量发现的易断裂的分枝状鹿角珊瑚。BARKER则认为博奈尔岛的潜水员更倾向于触摸块状珊瑚^[3],且分枝珊瑚的生长速率较快、具有从胁迫环境中更快恢复的能力^[60],因此该地发生了从块状珊瑚到分枝状珊瑚优势地位的转变。另外,一些密集潜水区的珊瑚物种多样性反而增加,可能是因为胁迫环境下珊瑚群落会出现更多易于扩散生长的机会种^[11]。因此,仅通过分析珊瑚覆盖率通常难以衡量珊瑚礁生态系统受潜水旅游影响的程度^[61]。

为此,笔者建议在比较活珊瑚覆盖率和群落组成等宏观生态指标的基础上,结合对潜水区珊瑚生理指标的测定,量化潜水等水下娱乐活动对珊瑚的影响。

2.2 潜水旅游对珊瑚礁鱼类的影响 目前,有关潜水活动对珊瑚礁鱼类影响的研究结果有较大分歧。对于活动能力较强的珊瑚鱼,人类活动通常对其迁移距离、觅食模式、多样性和丰度产生一定影响^[62]。一般来说,潜水作为一种入侵性活动^[63],会对鱼类的正常生存造成明显的负面影响^[64],不仅影响草食性鱼类的觅食行为^[65],还可能导致鱼群因躲避潜水员而发生群体逃逸行为^[66],使得潜水区部分珊瑚礁鱼类的数量显著降低。例如,潜水员的频繁活动使得泰国西海岸礁区的鱼类数量和多样性分别降低了44%和32%;STANLEY和WILSON(1995)发现,进行水下调查的潜水员因不可避免地惊扰潜水区的珊瑚鱼,记录到的鱼类密度与实际密度相比下降了41%~77%^[67]。潜水区生活习性不同的珊瑚礁鱼类数量有明显差异,其中活动能力强、警惕性高的鹦嘴鱼(*Amphilophus*)、刺尾鱼(*Acanthuridae*)和锥齿鲨(*Carcharias taurus*)的数量下降显著,它们因为潜水员在生境范围内的活动而调整游动轨迹、改变生存空间^[68];但蝴蝶鱼(*Chaetodontidae*)和隆头鱼(*Labridae*)较为依赖珊瑚礁生境^[69],它们在潜水区的群体数量依然较多^[70]。对于珊瑚礁鱼类因潜水活动产生群体逃逸的原因尚不明确,但根据观察到篮子鱼(*Siganidae*)和圆燕鱼(*Platax orbicularis*)在潜水员到达前便离开生活区域的现象^[71],有研究者认为是潜水员在水下发出的声音使鱼群感知到危险而发生群体逃逸。然而,水肺潜水活动大多产生低频率的声音,且鱼的听觉在低频时最为敏感,据计算至少在潜水员活动的200 m范围内,大多数鱼类都能识别到这种声音^[72],因此这种解释颇具争议。DICKENS等^[62]则认为潜水员被鱼类误认为是捕食者,是导致鱼群发生逃逸的主要原

因。另外,潜水区的少数鱼类可能会被游客的投喂行为吸引^[73],尤其是笛鲷(*Lutjanus*)和裸胸鳝(*Gymnothorax*)等捕食性鱼类^[74]在潜水区的数量通常会增加。

不少学者开始关注持续的潜水活动对各种鱼类生理行为带来的长期影响^[75]。珊瑚礁生态系统中存在着典型的互利共生关系,如海葵(*Bartholomea annulata*)与海葵虾(*Ancylomenes pedersoni*)合作清洁共生的珊瑚礁鱼类,这有助于维持鱼类多样性和生态系统功能^[76]。然而在潜水员存在的情况下,这种共生关系和清洁行为至少减少了50%。持续的潜水活动还可能使鲨鱼、大瓮篮子鱼(*Siganus doliatus*)^[62]的警惕性降低,因逐渐适应潜水员的存在,这些鱼类对于其生存范围内的人类活动没有表现出明显的逃逸行为^[77]。另外,频繁的潜水活动会使活动能力较弱的海马通过变换皮肤颜色进行自我伪装^[78],甚至被迫改变进食、求偶等时期的发声方式^[79],这会导致繁殖时期成对结合的个体分离^[80],繁殖成功率下降。潜水区许多珊瑚礁鱼类都存在生理行为方式的改变^[81]:它们在遭受人为干扰时,从原有的栖息地中迁出,去寻找新的生存空间^[82]。

2.3 潜水旅游对底栖藻类的影响

珊瑚礁中生长着多种底栖藻类,这些藻类是珊瑚礁生态系统的初级生产者和驱动食物网的重要碳源^[83]。研究结果表明,潜水活动对大型海藻、草皮海藻和钙化藻等底栖藻类的生长有明显影响。草食性动物往往通过消耗大型藻类,降低藻类与石珊瑚争夺空间的能力^[84]。然而,潜水活动导致鱼类发生大规模逃逸和觅食大型藻类的时间相对减少^[65],可能使珊瑚礁发生生态相变,由造礁石珊瑚占主导转变为大型海藻占据优势地位^[85]。而大型海藻抑制了珊瑚幼体的附着和定居,限制了支持不同生物的复杂生境的形成^[86],会导致礁区生物多样性降低。此外,大型海藻和草皮海藻的覆盖率常常随着潜水强度的增加而上升,而钙化藻作为石珊瑚幼体定居的重要底物,会随着潜水强度的升高、水下游客频繁扰动沉积物而显著减少^[87]。

2.4 潜水旅游对珊瑚礁生态系统及底栖无脊椎动物的影响

复杂的珊瑚礁三维结构^[88]对于栖息在珊瑚礁上的生物来说是至关重要的,既为鱼类提供了重要的避难所^[89],也为小型捕食性生物提供了伏击猎物的栖息地^[90]。船体抛锚和潜水活动会造成珊瑚礁生态系统结构复杂性降低以及底栖生物群落结构的改变^[91~92],尤其是较脆弱和生长速率较低的钙质底栖生物^[93]极易受到潜水活动的影响^[94]。COMA认为潜水频率的增加,减少了海底直立形生物的存活率^[95]。LYONS发现相较于低强度潜水区,博奈尔岛高强度潜水区的珊瑚礁结构复杂性和硬壳无脊椎动物的生物量分别降低了10%和42.6%^[91]。然而,也存在一些特殊情况:如海葵和甲壳纲的生物丰度较高,可能由于其比其他底栖生物更能适应潜水区环境^[92]。

潜水区草食性鱼类的减少会导致同样食底栖藻类^[96]的海胆丰度增加,至于对珊瑚礁生态系统是产生积极还是消极的影响,这取决于它们相对于珊瑚鱼(比如捕食它们的隆头鱼(*Labridae*)和鳞鲀(*Balistidae*))的丰度^[97]。海胆作为珊瑚礁生态系统主要的草食性动物,可以减缓珊瑚礁退化过程^[98];然而,过多的海胆又会侵蚀珊瑚礁体,破坏珊瑚礁生态系统^[99]。

3 对策与展望

近十几年来,有学者开始研究海南三亚蜈支洲岛等国内潜水旅游景点的珊瑚礁状况。与国外学者认为当今全世界的潜水活动超出珊瑚生态耐受极限的研究结果不同,吴钟解等^[100]认为蜈支洲岛利用半潜船海底观光、水肺潜水和水下摄影等多种旅游项目取代了以往捕捞、炸鱼、电鱼和采集珊瑚等不合理的资源利用方式,同时采用半年轮换潜水区域的模式,适当控制游客容量,不仅有效地保护了珊瑚礁,而且能够促进受影响和破坏的珊瑚礁得到修复和稳定,使珊瑚礁旅游业可持续健康发展。因此,控制游客数量、采取不同季节轮换潜水区域、规范潜水游客行为(如不触摸、踩踏珊瑚,不在潜水时排尿、不丢弃垃圾)都会减少潜水旅游活动对珊瑚礁的负面影响。

目前有关潜水旅游对珊瑚礁影响的研究还存在几点不足:首先,基于视频样带调查和实地观察得到的结论多为潜水活动对珊瑚群落造成的宏观影响,但仅通过分析珊瑚覆盖率、物种多样性与优势种等宏观指标不能准确反映珊瑚礁受潜水旅游活动影响的程度,也缺乏生理指标等微观层面的数据支撑。其

次,有关潜水对珊瑚礁生态系统、珊瑚礁鱼类和其他底栖生物群落的研究不足,结论存在较大争议。因此,针对以上问题笔者提出如下建议:(1)根据全世界不同海域的环境状况和人类活动程度,明确不同珊瑚礁区对于潜水旅游等水下娱乐项目的承载能力。这既有利于珊瑚礁的生态保护,也可为潜水旅游项目的可持续开发提供研究支撑。(2)未来相关研究可以考虑采用野外记录观测和室内模拟实验相结合的方式。通过模拟潜水区环境,从宏观和微观生理层面阐明潜水活动带来的影响。(3)尝试进行更多潜水活动对珊瑚礁生态系统以及底栖生物群落的研究,从系统层面阐明潜水旅游对珊瑚礁产生的影响。

参考文献:

- [1] 赵焕庭,王丽荣,袁家义.南海诸岛珊瑚礁可持续发展[J].热带地理,2016,36(1): 55–65.
- [2] TALGE H. Impact of recreational divers on scleractinian corals at Looe Key, Florida[C]. Proceedings of the Seventh International Coral Reef, 1992, 2: 1077–1082.
- [3] BARKER N H L, ROBERTS C M. Scuba diver behaviour and the management of diving impacts on coral reefs [J]. *Biological Conservation*, 2004, 120(4): 481–489.
- [4] ZAKAI D, CHADWICK-FURMAN N E. Impacts of intensive recreational diving on reef corals at Eilat, northern Red Sea [J]. *Biological Conservation*, 2002, 105(2): 179–187.
- [5] 张乔民,施祺,陈刚,等.海南三亚鹿回头珊瑚岸礁监测与健康评估[J].科学通报,2006(S3): 71–77.
- [6] 赵美霞,余克服,等.近50年来三亚鹿回头岸礁活珊瑚覆盖率的动态变化[J].海洋与湖沼,2010,41(3): 440–447.
- [7] LAMB J B, TRUE J D, PIROMVARAGORN S, et al. Scuba diving damage and intensity of tourist activities increases coral disease prevalence [J]. *Biological Conservation*, 2014, 178: 88–96.
- [8] AU C S, ZHANG L, CHUNG S S, et al. Diving associated coral breakage in Hong Kong: Differential susceptibility to damage [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 85(2): 789–796.
- [9] CAMP E, FRASER D. Influence of conservation education dive briefings as a management tool on the timing and nature of recreational SCUBA diving impacts on coral reefs [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2012, 61: 30–37.
- [10] HAWKINS J P, ROBERTS C M, HOF T V, et al. Effects of recreational scuba diving on Caribbean coral and fish communities [J]. *Conservation Biology*, 2010, 13(4): 888–897.
- [11] CREHAN O, MAIR J, SIANG HII YII, et al. Effect of tourism and sedimentation on coral cover and community structure [J]. *Tropical Life Sciences Research*, 2019, 30(2): 149.
- [12] DE K, NANAJKAR M, MOTE S G, ET AL. Coral damage by recreational diving activities in a marine protected area of India: Unaccountability leading to ‘tragedy of the not so common’ [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 155: 111190.
- [13] JUDITH K, CHARLES C, JASON S, 等.美国海洋和海岸带经济状况(2009)[J].经济资料译丛,2010(1): 1–61.
- [14] KRIEGER J R, CHADWICK N E. Recreational diving impacts and the use of pre-dive briefings as a management strategy on Florida coral reefs [J]. *Journal of Coastal Conservation*, 2013, 17(1): 179–189.
- [15] 刘真真.基于旅游环境承载力的中国海岛县(区)旅游功能区划分与定位研究[D].青岛:中国海洋大学,2014.
- [16] SALM R V. Coral reefs and tourist carrying capacity: the Indian Ocean experience [J]. *Ind. Environ.*, 1986, 9: 11–14.
- [17] HAWKINS J P, ROBERTS C M. Estimating the carrying capacity of coral reefs for SCUBA diving[C]. Panama: Proceedings of the 8th International Coral Reef Symposium, 1997, 2: 1923–1926.
- [18] SCHLEYER M H, TOMALIN B J. Damage on South African coral reefs and an assessment of their sustainable diving capacity using a fisheries approach [J]. *Bulletin of Marine Science*, 2000, 67(3): 1025–1042.
- [19] ZHANG L Y, CHUNG S S, QIU J W. Ecological carrying capacity assessment of diving site: A case study of Mabul Island, Malaysia [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 183(PT. 1): 253–259.
- [20] ROUPHAEL A B. The temporal and spatial patterns of impact caused by SCUBA diving in coral reefs, and the human and site specific characteristics that influence these patterns[J]. Ph. D. Thesis, James Cook University of North Queensland, Townsville, Australia, 1997.
- [21] 沈建伟,杨红强,王月,等.西沙永兴岛珊瑚礁坪的群落动态和浅水碳酸盐沉积特征[J].中国科学:地球科学,2014,44(3): 472–487.
- [22] 梁鑫,彭在清.广西涠洲岛珊瑚礁海域水质环境变化研究与评价[J].*海洋开发与管理*,2018,35(1): 114–119.
- [23] WIELGUS J, CHADWICK-FURMAN N E, DUBINSKY Z. Coral cover and partial mortality on anthropogenically impacted coral reefs at Eilat, northern Red Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 48(3/4): 248–253.
- [24] 刘伟华,张正旺.生态旅游对水生动物多样性的影响[J].天津师范大学学报(自然科学版),2015,35(3): 174–178.
- [25] MASTNY. A world watch addendum on coral reef [J]. *World Watch*, 2001, 14(3): 20–21.
- [26] P CHABANET, M ADJEROUD, S ANDREFOUET, et al. Human-induced physical disturbances and their indicators on

- coral reef habitats:a multi-scale approach [J]. *Aquat Living Resour*, 2005, 18(3): 215 – 230.
- [27] ROCHE R C, HARVEY C V, HARVEY J J, et al. Recreational Diving Impacts on Coral Reefs and the Adoption of Environmentally Responsible Practices within the SCUBA Diving Industry [J]. *Environmental Management*, 2016, 58(1): 107 – 116.
- [28] VICKI J. HARRIOTT, DERRIN DAVIS, 等. 澳大利亚东部海洋保护区中的消遣性潜水及其影响 [J]. AMBIO-人类环境杂志, 1997, 26(3): 169 – 175.
- [29] INGLIS R G J. Increased spatial and temporal variability in coral damage caused by recreational scuba diving [J]. *Ecological Applications*, 2002, 12(2): 427 – 440.
- [30] HEMERY G, MCCLANAHAN T R. Effect of recreational fish feeding on reef fish community composition and behaviour [J]. *Western Indian Ocean Journal of Marine Science*, 2005, 4(2): 123 – 133.
- [31] Hughes T P, Baird A H, Bellwood D R, et al. Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs [Review] [J]. *Science*, 2003, 301(5635): 929 – 933.
- [32] WIEDENMANN J, D'ANGELO C, SMITH E G, et al. Nutrient enrichment can increase the susceptibility of reef corals to bleaching [J]. *Nature Climate Change*, 2012, 3(2): 160 – 164.
- [33] VAGO R, VAGO E, ACHITUV Y, et al. A Non-destructive method for monitoring coral growth affected by anthropogenic and natural long term changes [J]. *Bulletin of Marine Science Miami*, 1994, 55(1): 126 – 132.
- [34] WOOLDRIDGE S A. Water quality and coral bleaching thresholds: Formalising the linkage for the inshore reefs of the Great Barrier Reef, Australia [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58(5): 745 – 751.
- [35] 吕永龙, 苑晶晶, 李奇锋, 等. 陆源人类活动对近海生态系统的影响 [J]. *生态学报*, 2016, 36(5): 1183 – 1191.
- [36] SMITH J E, SHAW M, EDWARDS R A, et al. Indirect effects of algae on coral: algae-mediated, microbe-induced coral mortality [J]. *Ecology Letters*, 2006, 9(7): 835 – 845.
- [37] BONGIORNI L, SHAFIR S, ANGEL D, et al. Survival, growth and gonad development of two hermatypic corals subjected to in situ fish-farm nutrient enrichment [J]. *Marine Ecology Progress*, 2003, 253(1): 137 – 144.
- [38] MCCOOK L, JOMPA J, DIAZ-PULIDO G. Competition between corals and algae on coral reefs: A review of evidence and mechanisms [J]. *Coral Reefs*, 2001, 19(4): 400 – 417.
- [39] 牛文涛, 徐宪忠, 林荣澄, 等. 沉积物对珊瑚礁及礁区生物的影响 [J]. *海洋通报*, 2010, 29(1): 106 – 112.
- [40] B RIEGL. Effects of sand deposition on scleractinian and alcyonacean corals [J]. *Marine Biology*, 1995, 121(3): 517 – 526.
- [41] EVA P, KATHARINA F. Photophysiological stress in scleractinian corals in response to short-term sedimentation [J]. *Journal of Experimental Marine Biology & Ecology*, 2003, 287(1): 57 – 78.
- [42] 邢帅, 谭烨辉, 周林滨, 等. 水体浑浊度对不同造礁石珊瑚种类共生虫黄藻的影响 [J]. *科学通报*, 2012, 57(5): 348 – 354.
- [43] TERRON-SIGLER A, LEON-MUEZ D, PENALVER-DUQUE P, et al. The effects of SCUBA diving on the endemic Mediterranean coral *Astroites calycularis* [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2016, 122(3): 1 – 8.
- [44] ROSENBERG E, KOREN O, RESHEF L, et al. The role of microorganisms in coral health, disease and evolution [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2007, 5(5): 355 – 62.
- [45] CARILLI J E, NORRIS R D, BLACK B, Et al. Century-scale records of coral growth rates indicate that local stressors reduce coral thermal tolerance threshold [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(4): 1247 – 1257.
- [46] MYDLARZ L D, JONES L E, HARVELL C D, et al. Innate immunity, environmental drivers and disease ecology of marine and freshwater invertebrates [J]. *Evol Syst*, 2006, 37: 251 – 288.
- [47] PAGE C A, WILLIS B L. Epidemiology of skeletal eroding band on the Great Barrier Reef and the role of injury in the initiation of this widespread coral disease [J]. *Coral Reefs*, 2008, 27(2): 257 – 272.
- [48] LAMB J B, WILLIS B L. Using coral disease prevalence to assess the effect of concentrating tourism activities on offshore reefs in a tropical marine park [J]. *Conserv. Biol*, 2011, 25(5): 1044 – 1052.
- [49] ALTIZER S, OSTFELD R S, JOHNSON P T, et al. Climate change and infectious diseases: from evidence to a predictive framework [J]. *Science*, 2013, 341(6145): 514 – 519.
- [50] JOSEPH P F, LAMB J B, FIELD S N, et al. Sediment and turbidity associated with offshore dredging increase coral disease prevalence on nearby reefs [J]. *PLOS ONE*, 2014, 9(7): e102498.
- [51] KLINE D I, KUNTZ N M, BREITBART M, et al. Role of elevated organic carbon levels and microbial activity in coral mortality [J]. *Marine Ecology Progress*, 2006, 314(May): 119 – 125.
- [52] ROSE C, RISK M. Increase in *Cliona delitrix* infestation of *Montastrea cavernosa* heads on an organically polluted portion of the Grand Cayman Fringing Reef [J]. *Marine Ecology*, 1985, 6(4): 345 – 363.
- [53] BONGIORNI L, RINKEVICH B. The pink-blue spot syndrome in *Acropora eurystoma* (Eilat, Red Sea): A possible marker

- of stress [J]. *Zoology*, 2005, 108(3): 247 – 256.
- [54] PALMER C V, MYDLARZ L D, Willis B L. Evidence of an inflammatory-like response in non-normally pigmented tissues of two scleractinian corals [J]. *Proceedings. Biological Sciences*, 2018, 275(1652): 2687 – 2693.
- [55] JOAQUIM, GARRABOU, ENRIC, et al. The impact of diving on rocky sublittoral communities: A case study of a Bryozoan population [J]. *Conservation Biology*, 2008.
- [56] 黄丁勇, 李元超, 王建佳, 等. 亚龙湾西岸造礁石珊瑚种类多样性及恢复潜力分析 [J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(3): 444 – 455.
- [57] ERFTEMEIJER P L A, RIEGL B, HOEKSEMA B W, et al. Environmental impacts of dredging and other sediment disturbances on corals: A review [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(9): 1737 – 1765.
- [58] TIANRAN C, KEFU Y U, QI S, et al. Twenty-five years of change in scleractinian coral communities of Daya Bay (northern South China Sea) and its response to the 2008 AD extreme cold climate event [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(12): 2107 – 2117.
- [59] LENIHAN H S, HOLBROOK S J, SCHMITT R J, et al. Influence of corallivory, competition, and habitat structure on coral community shifts [J]. *Ecology*, 2011, 92(10): 1959 – 1971.
- [60] 周红英, 姚雪梅, 黎李, 等. 海南岛周边海域造礁石珊瑚的群落结构及其分布 [J]. *生物多样性*, 2017, 25(10): 1123 – 1130.
- [61] DINSDALE E A, HARRIOTT V J. Assessing anchor damage on coral reefs: a case study in selection of environmental indicators [J]. *Environmental Management*, 2004, 33(1): 126 – 139.
- [62] DICKENS L C, GOATLEY C H R, TANNER J K, et al. Quantifying relative diver effects in underwater visual censuses [J]. *PLoS ONE*, 2011, 6(4): e18965.
- [63] MARC B S , HUBERT G. Influence of scuba divers on the avoidance reaction of a dense vendace (*Coregonus albula* L.) population monitored by hydroacoustics [J]. *Fisheries Research*, 2006, 82(1-3): 131 – 139.
- [64] 王丽荣, 赵换庭, 宋朝景. 人类活动对徐闻灯楼角珊瑚礁生态系统的影响 [J]. *海洋开发与管理*, 2006(1): 81 – 85.
- [65] RENFRO B. Impacts of diving tourists on coral reef community structure and herbivorous reef fish foraging behavior [D]. Alabama: Auburn University, 2016.
- [66] PRISCILLA C P , PILAR H , FERNANDA G P. Shark reactions to scuba divers in two marine protected areas of the Eastern Tropical Pacific [J]. *Aquatic Conservation Marine & Freshwater Ecosystems*, 2011, 21: 239 – 246.
- [67] STANLEY D R, WILSON C A. Effect of scuba divers on fish density and target strength estimates from stationary dual-Beam Hydroacoustics [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1995, 124(6): 946 – 949.
- [68] SMITH K, SCARR M, SCARPACI C. Grey nurse shark (*Carcharias taurus*) diving tourism: Tourist compliance and shark behaviour at Fish Rock, Australia [J]. *Environmental Management*, 2010, 46(5): 699 – 710.
- [69] BERUMEN M L, PRATCHETT M S. Recovery without resilience: Persistent disturbance and long-term shifts in the structure of fish and coral communities at Tiahura Reef, Moorea [J]. *Coral Reefs*, 2006, 25(4): 647 – 653.
- [70] 吴钟解, 蔡泽富, 陈石泉, 等. 海南岛东岸、南岸浅水礁区近 10 年珊瑚礁鱼类种类分布及多样性探讨 [J]. *水产学报*, 2015, 39(8): 1203 – 1217.
- [71] BELLWOOD D R, HUGHES T P, HOEY A S. Sleeping functional group drives coral reef recovery [J]. *Curr Biol*, 2006, 16(24): 2434 – 2439.
- [72] RADFORD C A, JEFFS A G, TINDLE C T, et al. Bubbled waters: The noise generated by underwater breathing apparatus [J]. *Marine Behaviour & Physiology*, 2005, 38(4): 259 – 267.
- [73] WATSON D L, HARVEY E S. Behaviour of temperate and sub-tropical reef fishes towards a stationary SCUBA diver [J]. *Marine & Freshwater Behaviour & Physiology*, 2007, 40(2): 85 – 103.
- [74] SWEATMAN, H. P. A. Impact of tourist pontoons on fish assemblages on the Great Barrier Reef [R]. Technical Report 5. CRC Reef research Centre, Townsville, Australia, 1996.
- [75] BRADLEY D, PAPASTAMATIOU Y P, CASELLE J E. No persistent behavioural effects of SCUBA diving on reef sharks [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2017, 567(13): 173 – 184.
- [76] MCCAMMON A, SIKKEL P C, NEMETH D. Effects of three Caribbean cleaner shrimps on ectoparasitic monogeneans in a semi-natural environment [J]. *Coral Reefs*, 2010, 29(2): 419 – 426.
- [77] MALJKOVI A, ISABELLE M, et al. Effects of tourism-related provisioning on the trophic signatures and movement patterns of an apex predator, the Caribbean reef shark [J]. *Biological Conservation*, 2011, 144(2): 859 – 865.
- [78] GARRICK-MAIDMENT N. A note on the status of indigenous species of seahorse [J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1998, 78(3): 1043.
- [79] OLIVEIRA T P R, LADICH F, ABED-NAVANDI D, et al. Sounds produced by the longsnout seahorse: a study of their structure and functions [J]. *Journal of Zoology*, 2014.

- [80] ANDERSON P A, BERZINS I K, FOGARTY F, et al. Sound, stress, and seahorses: The consequences of a noisy environment to animal health [J]. *Aquaculture*, 2011, 311(1-4): 129 – 138.
- [81] BRACCIALI C, CAMPOBELLO D, GIACOMA C, et al. Effects of nautical traffic and noise on foraging patterns of Mediterranean damselfish (*Chromis chromis*) [J]. *PLoS ONE*, 2012, 7(7): e40582.
- [82] Geffroy B, Samia D S M, Bessa E, et al. How Nature-Based Tourism Might Increase Prey Vulnerability to Predators [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2015, 30(12): 755 – 765.
- [83] 朱文涛, 秦传新, 马鸿梅, 等. 大亚湾珊瑚礁生态系统简化食物网的稳定同位素 [J]. *水产学报*, 2020, 44(7): 1112 – 1123.
- [84] NED D, PAUL H. Reef Fish Behavior: Florida, Caribbean, Bahamas. Jacksonville[M]. FL: New World Publication, 1999.
- [85] 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 [J]. *生态学报*, 2016, 36(21): 6687 – 6695.
- [86] GRAHAM N A, WILSON S K, JENNINGS S, et al. Dynamic fragility of oceanic coral reef ecosystems [J]. *Proc Natl Acad Sci*, 2006, 103(22): 8425 – 8429.
- [87] FABRICIUS K, De'ath G. Environmental factors associated with the spatial distribution of crustose coralline algae on the Great Barrier Reef [J]. *Coral Reefs*, 2001.
- [88] 黄玲英, 余克服. 珊瑚疾病的主要类型、生态危害及其与环境的关系 [J]. *生态学报*, 2010, 30(5): 1328 – 1340.
- [89] MESSMER V, JONES G P, MUNDAY P L, et al. Habitat biodiversity as a determinant of fish community structure on coral reefs [J]. *Ecology*, 2011, 92: 2285 – 2298.
- [90] HOLBROOK S J, BROOKS A J, SCHMITT R J. Variation in structural attributes of patch-forming corals and in patterns of abundance of associated fishes [J]. *Marine & Freshwater Research*, 2002, 53(7): 1045 – 1053.
- [91] LYONS P J, ARBOLEDA E, BENKWITT C E, et al. The effect of recreational SCUBA divers on the structural complexity and benthic assemblage of a Caribbean coral reef [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2015, 24(14): 3491 – 3504.
- [92] RENFRO B, CHADWICK N E. Benthic community structure on coral reefs exposed to intensive recreational snorkeling [J]. *Plos One*, 2017, 12(9): e0184175.
- [93] BALLESTEROS E. Mediterranean coralligenous assemblages: a synthesis of present knowledge [J]. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 2006, 44: 123 – 195.
- [94] LLORET J, MARÍN A, MARÍN-GUIRAO L, et al. An alternative approach for managing scuba diving in small marine protected areas [J]. *Aquatic Conservation Marine and Freshwater Ecosystems*, 2006, 16(6): 579 – 591.
- [95] COMA R, POLA E, RIBES M, et al. Long-term assessment of temperate octocoral mortality patterns, protected vs. unprotected areas [J]. *Ecological Applications*, 2004, 14(5): 1466 – 1478.
- [96] 黄端杰, 许强, 李秀保, 等. 三亚蜈支洲岛珊瑚礁—沙质底复合区棘皮动物群落结构 [J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(1): 103 – 113.
- [97] MCCLANAHAN T R. Recovery of a coral reef keystone predator, *Balistapus undulatus*, in East African marine parks [J]. *Biological Conservation*, 2000, 94(2): 191 – 198.
- [98] CARPENTER R C, EDMUNDS P J. Local and regional scale recovery of Diadema promotes recruitment of scleractinian corals [J]. *Ecology Letters*, 2010, 9(3): 271 – 280.
- [99] CABANILLAS-TERA'N N, LOOR-ANDRADE P, RODRI'GUEZ-BARRERAS R, et al. Trophic ecology of sea urchins in coral-rocky reef systems [J]. *Ecuador Peer J*, 2016(4): e1578.
- [100] 吴钟解, 陈春华, 丁翔宇. 三亚蜈支洲珊瑚礁观光旅游活动对珊瑚及其生态的影响探讨 [J]. *海洋开发与管理*, 2011(3): 57 – 60.

A Review of Impact of Diving Tourism on Coral Reef Ecosystem

ZHANG Yu¹, REN Yuxiao¹, LIU Xiangbo¹, ZHU Ming¹, WANG Aimin^{1,2}, LI Xiubao^{1,2}

(1. College of Marine Science, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. State Key Laboratory of Marine Resource Utilization in South China Sea, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China)

Abstract: Scuba diving is considered as an ecotourism activity with high economic value, which has little impact on coral reefs in the early days. However, as diving tourism has become increasingly popular recently many studies have shown that the coral reef degradation is exacerbating in the diving areas around the world for the reason that the times of diving each year in some intensive diving areas greatly exceed the ecological carrying capacity of coral reefs. A review was made of the researches on the ecological carrying capacity of coral reefs for diving tourism and the main factors of diving tourism affecting coral reefs, and the impacts of diving activities on corals, coral fishes, benthic communities and coral reef ecosystem were summarized. Some suggestions for future research were made based on the review. It is highly advisable to identify the ecological carrying capacity of coral reefs in different areas for diving tourism, combine indoor simulation with the field monitoring and observation, and make a systematic research on the impact of tourism on the coral reef system other marine organisms.

Keywords: coral reef; coral conversation; diving tourism; human activity; ecological carrying capacity

(责任编辑:罗启香 责任编辑:钟云芳)