

全球珊瑚礁白化的多尺度驱动机制与时空格局综述

董晓晖¹ 陶天慧¹ 史东辉² 胡羽楠¹ 祝闽帆¹ 甘霖³

1. 浙江水利水电学院测绘科学与技术学院, 中国·浙江 杭州 310018

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国·北京 100101

3. 浙江南方测绘科技有限公司, 中国·浙江 湖州 313299

摘要: 珊瑚礁是具有不可替代价值的关键生态系统, 但目前正遭受日益严重的白化威胁。本文系统综述了白化的时空演变规律与多尺度驱动机制。时间上, 大规模白化复发间隔已从数十年缩短至不足六年, 恢复能力严重衰退。空间上, 白化呈现纬度梯度差异并向高纬度扩散, 而垂直避难所作用有限。其驱动机制是全球气候胁迫与区域人为压力协同作用的结果: 海洋热浪直接触发白化, 海洋酸化削弱珊瑚钙化; 同时, 陆源污染和过度捕捞显著降低了珊瑚的抵抗与恢复力。这些压力通过破坏共生关系、引发生态位转换等级联效应, 最终导致系统崩溃。珊瑚白化已成为一场人为气候变化的系统性危机, 唯有结合全球协同减排与区域性生态管理, 方能为珊瑚礁争取生存机遇。

关键词: 珊瑚礁白化; 多尺度驱动; 时空格局; 适应性管理

A Review of the Multi-Scale Driving Mechanisms and Spatiotemporal Patterns of Global Coral Reef Bleaching

Dong Xiaohui¹, Tao Tianhui¹, Shi Donghui², Hu Yunan¹, Zhu Minfan¹, Gan Lin³

1. College of Geomatics, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, China Zhejiang Hangzhou 310018

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, China Beijing 100101

3. Zhejiang Southern Surveying and Mapping Technology Co., Ltd., China Zhejiang Huzhou 313299

Abstract: Coral reefs are irreplaceable ecosystems currently facing severe bleaching threats. This review systematically examines the spatiotemporal patterns and multi-scale driving mechanisms of bleaching. Temporally, the recurrence interval of mass bleaching events has shortened from decades to less than six years, with recovery capacity severely declining. Spatially, bleaching exhibits latitudinal gradients and is expanding to higher latitudes, while vertical refugia provide limited protection. The drivers involve synergistic interactions between global climatic stressors and regional anthropogenic pressures: marine heatwaves directly trigger bleaching, while ocean acidification undermines coral calcification. Concurrently, land-based pollution and overfishing significantly reduce coral resistance and resilience. These pressures lead to systemic collapse through cascading effects such as symbiosis breakdown and ecological niche shifts. Coral bleaching has become a systemic crisis driven by anthropogenic climate change, and only integrated global emission reduction and regional ecological management can secure a chance for survival.

Keywords: Coral reef bleaching; Multi-scale drivers; Spatiotemporal patterns; Adaptive management

0 引言

珊瑚礁是海洋生产力最高、生物多样性最丰富的生态系统, 被誉为海洋“热带森林”^[1]。尽管其地理覆盖面积不足全球海洋 0.25%, 却为超过四分之一海洋生物提供栖息地, 在维护海洋生物基因库、保障渔业资源、海岸防护及支撑旅游业方面发挥着核心作用^[2]。然而, 自工业革命以来, 全球珊瑚礁经历了广泛退化, 其核心表征便是日益频繁与严重的“珊瑚白化”事件。

白化是珊瑚与共生虫黄藻关系崩溃的生理现象, 若持

续将导致珊瑚死亡。白化已从偶发灾害演变为系统性生态危机。大规模白化事件的复发间隔从 20 世纪 80 年代的每 25-30 年一次, 急剧缩短至 2016 年的每 5.9 年一次。模型预测表明, 即使全球变暖被限制在 1.5°C, 仍可能有 70%-90% 的珊瑚礁消失。这一危机的驱动机制复杂, 是全球气候变化与区域人为压力多尺度协同作用的结果^[3]。

本文旨在系统整合现有研究, 剖析珊瑚礁白化的多尺度驱动机制与时空演变格局, 以期认知危机本质、制定保护策略提供科学框架。

1 珊瑚礁的多维价值、退化损失与恢复力基础

1.1 珊瑚礁的多维价值体系

珊瑚礁的价值构成一个复合网络。其生态基石作用无可替代：复杂结构为大量海洋物种提供栖息地；能消散高达 97% 的波浪能量，是海岸线的天然守护者；并与红树林、海草床构成重要的“蓝碳”系统。这一生态基础支撑着庞大的经济价值。据估算，全球珊瑚礁每年产生的生态系统服务价值约为 2.7 万亿美元^[4]。其中，由珊瑚礁驱动的滨海旅游业是全球许多地区的经济命脉，年价值约 360 亿美元。例如，对马尔代夫而言，珊瑚礁旅游收入曾占其 GDP 的 28.7%。超越直接经济价值，珊瑚礁还是潜力巨大的“蓝色药柜”，其生物合成的独特化合物是新药研发的重要来源，但快速退化正导致大量未被认知的基因资源面临永久丧失。

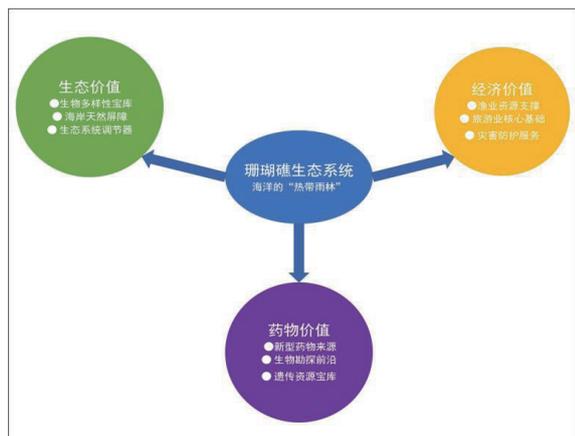


图1 珊瑚礁生态系统多维价值体系示意图

1.2 退化引发的多维损失

珊瑚礁退化直接侵蚀其服务功能，引发深远的生态与社会经济损失。全球尺度评估显示，气候变化导致的珊瑚礁退化每年造成数十亿至数百亿美元的经济价值损失。在区域层面：渔业上，栖息地退化导致渔业生产力衰退，如菲律宾珊瑚礁渔业曾年贡献近 10 亿美元，现已严重受损；旅游业上，白化与景观退化直接打击旅游收益，历史上区域性白化事件曾造成数千万美元的非市场价值损失；海岸防护上，礁体结构退化削弱其防波功能，迫使社区承担巨额人工防护成本并面临资产风险激增，马尔代夫首都马累曾因此遭受严重洪灾损失。这些损失是全方位的，且已从潜在风险转化为现实的民生压力^[5]。

1.3 恢复力的关键因素

珊瑚礁的生态恢复力（面对干扰后维持或恢复功能的能力）取决于多层次的生物与生态过程。首先，珊瑚种群

自身的补充能力是基石，依赖于成体存活与幼虫成功定植，而健康“源礁”对维持区域幼虫供应至关重要。其次，生态系统功能完整性，特别是关键的食藻鱼类群落，通过控制藻类为珊瑚恢复创造空间，其缺失会严重削弱恢复能力^[6,7]。再者，微观的“全生物”（包括珊瑚、虫黄藻及关联微生物）稳态对宿主健康与胁迫抵抗至关重要，环境压力会破坏这种平衡。最后，宏观的生态连通性（幼虫扩散、区域性气候事件）深刻影响局部恢复进程。因此，增强恢复力需从减少胁迫、保护关键功能群和保障连通性等多方面协同行动。

2 全球珊瑚礁白化的多尺度驱动机制：从气候胁迫到生态级联效应

珊瑚礁白化，即珊瑚与其体内共生虫黄藻的互利关系被破坏、导致虫黄藻被排出或色素丧失的现象，已成为全球珊瑚礁生态系统面临的最严峻威胁^[8]。这一过程远非单一因素所致，而是由全球尺度的气候胁迫与区域尺度的人为压力交织作用，并通过生态系统内部的复杂相互作用（竞争、共生、疾病）最终触发的级联式生态崩溃。

2.1 全球性气候胁迫

全球气候变化是珊瑚白化的主要驱动因素，其中海面温度异常升高及持续的海洋热浪是直接诱因。海水变暖破坏珊瑚与虫黄藻的共生平衡，导致虫黄藻光合作用受抑制并产生活性氧等有害物质。热胁迫累积效应常用热周度（DHW）衡量，当 $DHW \geq 4$ 时，大堡礁白化率超 50%。自 20 世纪 80 年代以来，全球严重白化事件复发频率增加约五倍，其强度已接近生态系统承受极限。最新研究表明，白化风险正从偶发的表层温度异常，转向更持续的结构性能热暴露模式^[9-11]。在特定海域（如大陆东部边缘），海洋热量可能在表层以下汇聚和滞留，形成持续的次表层高温水团，即使在没有强烈厄尔尼诺事件时，也会因中等强度扰动上涌而导致大面积白化，这使得白化预测更为复杂。

与此同时，海洋酸化是另一项关键的全球性胁迫。海水吸收过量 CO_2 导致 pH 值与文石饱和度下降，直接抑制珊瑚骨骼形成。研究表明，pH 降至 7.8 可使珊瑚钙化率降低约 30%；文石饱和度从 3.5 降至 2.0 时，部分鹿角珊瑚钙化率减少 20%-40%。酸化不仅使骨骼更脆弱，还干扰珊瑚的能量平衡，削弱其应对高温等其他压力的能力^[10]。

重要的是，这些全球性压力因子极少单独作用，而是产生显著协同叠加效应，其负面影响往往大于各因子之和。例如，“高温 + 酸化”的双重胁迫下，珊瑚不仅因虫黄藻流失而能量短缺，还需为维持钙化消耗更多能量，导致钙

化率下降幅度远超单一胁迫,且幼虫附着与存活率急剧降低。同时,海洋热浪期间的高温若与强太阳辐射叠加,会加剧光抑制与氧化损伤;风暴则通过物理破坏、增加浊度及沉积物覆盖等方式,与热应激共同加速白化与死亡进程^[11]。

2.2 区域尺度人为压力

区域性人为活动显著放大了全球气候胁迫对珊瑚礁的影响。其中,沿海开发导致的陆源污染是核心压力:农业径流和污水排放使过量营养盐输入海域,引发富营养化。这不仅刺激大型藻类和微藻爆发性生长,与珊瑚竞争光照和空间,还会加剧珊瑚在热胁迫下的氧化应激。研究表明,营养盐富集可使珊瑚对温度引起白化的敏感性提高数倍,形成“富营养化-藻类竞争-白化加剧”的恶性循环。同时,沉积物排放增加水体浊度,既遮蔽光照影响珊瑚光合作用,其沉降覆盖更会窒息珊瑚虫^[12]。

过度捕捞(尤其针对食藻鱼类)是另一项关键局部压力。食藻鱼类(如鹦嘴鱼)能有效控制藻类,为珊瑚幼体提供生存空间。其数量锐减会削弱珊瑚礁的自我调节能力。白化事件后,缺乏制约的藻类将迅速占据裸露礁基,阻碍珊瑚恢复,甚至可能引发生态系统向藻类主导状态不可逆的“相变”。此外,破坏性捕捞、旅游活动产生的物理伤害及化学污染物(如防晒霜)也在不同维度加剧珊瑚的生理压力。虽然长期观测表明,与海水热胁迫相比,这些局部压力对白化范围的影响相对次要,但它们确实会显著削弱珊瑚个体健康,从而降低其对热胁迫的整体抵抗能力^[10-12]。

2.3 生态系统级联效应

全球与区域压力通过破坏珊瑚礁内部的生物相互作用,引发级联效应,导致系统功能瓦解。这一过程始于珊瑚-虫黄藻共生关系的破裂。虫黄藻为珊瑚提供约90%的能量,并参与其代谢与免疫调节。共生关系解体使珊瑚陷入能量短缺与生理衰弱。值得注意的是,在压力环境下(如冲绳海域),某些珊瑚物种间的杂交可能加剧,这虽可能带来适应性基因组合,但也会改变原有的生态功能。

随后,生态平衡发生根本改变。白化死亡的珊瑚为藻类扩张腾出空间。在营养盐过剩和食草动物不足的区域,藻类迅速占据优势,与珊瑚竞争光照和空间,并通过释放化感物质抑制珊瑚生长,同时营造更利于病原体滋生的微环境。这一从“珊瑚主导”到“藻类主导”的转变是系统退化的重要标志。

与此同时,压力导致珊瑚微生物组(包括细菌、古菌和病毒)稳态紊乱。热应激与污染破坏珊瑚与共生微生物的平衡,导致条件致病菌(如弧菌)增殖,引发“微生物

失调”。这不仅直接增加珊瑚患病风险(如石珊瑚组织损失病),还进一步削弱其免疫与代谢功能。

因此,全球珊瑚礁白化是由气候胁迫触发,经人为压力放大,通过破坏共生关系、引发藻类竞争与微生物失衡等级联效应,最终导致生态系统崩溃的复杂过程。

3 全球珊瑚礁白化的时空演变格局:频率、恢复周期与避难所

过去三十余年的观测与研究清晰地揭示,珊瑚礁白化已从偶发性局部扰动演变为一场席卷全球的、与人为气候变化紧密交织的系统性生态危机。

3.1 时间格局演变:加速的频率与衰退的恢复力

3.1.1 白化事件频率的急剧增加

自20世纪80年代以来,全球珊瑚礁系统步入了以人类活动为主导的“人类世”新阶段。其最显著的特征之一是大规模白化事件发生频率的急剧加快。这一变化与全球海表温度的持续上升直接相关,而厄尔尼诺-南方涛动等气候模态的叠加,往往触发全球性或区域性的白化高峰^[6]。1998年、2010年、2014-2017年以及2023-2024年的四次全球性白化事件,均与强烈的海洋热浪事件同步,影响范围覆盖了全球主要珊瑚礁区。值得警惕的是,近年来的白化事件(如2014-2017年和2023年)甚至在强厄尔尼诺现象达到峰值前就已开始,表明白化的驱动因素已超越单纯的ENSO周期,与背景全球变暖的协同作用日益增强。尽管有研究指出,过去十年间触发白化的海温阈值比上一个十年升高了约0.5°C,暗示了珊瑚种群可能存在有限的适应性(如通过耐热基因型筛选),但其代价是珊瑚群落生物多样性与生态系统功能的大幅退化。

3.1.2 恢复周期延长与恢复结果的不确定性

在人类世之前,珊瑚礁生态系统通常能在十年尺度上从如白化等干扰中恢复。然而,当前频繁发生的白化事件严重削弱了这种恢复能力。一方面,恢复所需的时间窗口被急剧压缩。许多珊瑚礁在白化后尚未完全恢复,便再度遭受新的热应力冲击。另一方面,恢复的结果发生了根本性改变。频繁的干扰阻碍了珊瑚礁恢复至原有的物种组成和结构状态,往往导致耐热性较强的“先锋物种”比例上升,而复杂性和多样性降低,生态系统可能发生永久性的稳态转换。全球珊瑚礁监测网(GCRMN)的数据证实了这一趋势:自2010年以来,全球硬珊瑚平均覆盖率持续下降,而藻类覆盖则增加了约20%。2014-2017年的超长白化事件导致全球约15%的珊瑚死亡,其影响在多年后仍未完全消除。恢复不再是简单的线性回归,而是充满了不确定

定性,且整体趋势指向生态系统结构和功能的净退化^[11,12]。

3.2 空间格局异质性: 纬度梯度与潜在避难所

3.2.1 纬度梯度与珊瑚范围变迁

白化的风险与影响在全球范围内并非均质分布。研究显示,与珊瑚多样性最高的赤道核心区相比,赤道两侧中纬度地区(约南北纬 15° -20° 之间)的珊瑚礁发生白化的概率更高。这可能与该区域物种组成、环境历史及热应激阈值有关。与此同时,作为对变暖的响应,珊瑚种群呈现向更高纬度扩散的迹象。在亚热带地区(20° -35°),幼年珊瑚的补充量被观测到显著增加。然而,这种向极迁移面临多重挑战:高纬度水域温度虽适宜,但霰石饱和度较低,可能限制珊瑚骨骼生长;同时,这些区域的生态系统结构与热带珊瑚礁不同,珊瑚适应新环境存在限制。因此,纬度梯度既体现了白化风险的差异,也揭示了物种分布动态变化的复杂前景。

3.2.2 垂直避难所: 深海与浑浊水域的潜力与局限

在水平迁移受限的背景下,垂直空间上的“避难所”概念受到广泛关注。这主要指那些可能缓解热应力的环境,包括较深的礁区(中光层珊瑚生态系统,通常指 30-150 米以深)和浑浊的近岸水域。理论上,这些区域或因水温较低、或因光照减弱(从而降低珊瑚共生体的光氧化压力),可在表层发生严重热浪时为珊瑚提供喘息之机。例如,一些研究表明,在特定区域(如红海北部、某些深海礁坡),较深水域的珊瑚在白化事件中受损较轻。

然而,这些避难所的普遍有效性和容量存在争议与局限。首先,中光层环境光照不足,许多主要的浅水造礁珊瑚物种无法在此长期繁盛,其生态系统功能也与浅水礁不同。其次,浑浊水域的遮蔽作用可能同时抑制珊瑚生长所需的正常光合作用。更重要的是,持续的、强烈的海洋热浪可以穿透至相当深度,使得深海避难所的作用大打折扣,如 2016 年大堡礁的白化事件就影响到了深水珊瑚群落。此外,依靠上升流或内部波浪降温的局部区域虽可能成为临时避难所,但其空间范围往往有限^[12]。因此,尽管垂直避难所为部分珊瑚群体提供了短期生存机会,并可能成为辅助保育的目标区域,但它们无法在全局上抵消大面积浅水珊瑚礁因高频热事件而面临的系统性崩溃风险。

4 结语

全球珊瑚礁白化的时空演变格局清晰地揭示了一个由人类活动主导的生态悲剧。在时间上,系统已步入大规模、高频次白化的新常态,恢复能力濒临崩溃。在空间上,尽

管存在异质性与局域避难潜力,但全球性海洋热浪正无情地侵蚀所有缓冲。这一格局的根本驱动力是人为温室气体排放导致的全球变暖,厄尔尼诺等自然变率已退居为叠加放大器。珊瑚白化由此质变为标志地球生态系统对工业化文明响应的系统性危机。

现有基于局地的保护与管理措施,对于延缓退化、维持局部生态功能虽仍有价值,但无法从根本上扭转全球趋势。科学的结论指向唯一且紧迫的出路:唯有通过全球协同的、迅速且根本性的温室气体减排,将全球变暖控制在最低水平,才能稳定气候系统,为珊瑚礁及其所支撑的浩瀚生命网络争取生存与适应的最终机会。时间,正在成为最稀缺的生态资源。

参考文献:

- [1] 刘胜. 珊瑚礁生态系统研究的发展、挑战与希望[J]. 热带海洋学报, 2024,43(03):1-2.
- [2] Woodhead, Anna J., et al. "Coral reef ecosystem services in the Anthropocene." *Functional Ecology* 33.6 (2019): 1023-1034.
- [3] McWhorter, Jennifer K., et al. "The importance of 1.5 C warming for the Great Barrier Reef." *Global Change Biology* 28.4 (2022): 1332-1341.
- [4] 索琳琳. 基于多源遥感数据的珊瑚礁白化监测研究[D]. 山东科技大学, 2018.
- [5] 滕君灿, 余克服, 左秀玲等. 相对高纬度珊瑚礁的有限弹性: 气候变化和人类影响下的结构复杂度退化[J]. 中国科学: 地球科学, 2026,56(01):76-87.
- [6] 迟豪君, 张政, 程娇等. 南海珊瑚礁水体中虫黄藻(Symbiodiniaceae)的多样性与分布格局[J]. 海洋与湖沼, 2025,56(06):1397-1408.
- [7] 覃宾妮, 黄丁勇, 林金兰等. 珊瑚白化监测、预警及其在珊瑚礁生态修复中的警示意义[J]. 广西科学, 2025,32(04):757-779.
- [8] 康志鹏, 刘永, 李纯厚等. 西沙群岛永乐四岛礁珊瑚礁区域鱼类物种组成及其差异[J]. 上海海洋大学学报, 2025,34(03):618-635.
- [9] 李泽琛. 夜光遥感指示的人类活动对全球珊瑚礁生态系统健康状况的影响研究[D]. 广西大学, 2025.
- [10] 胡思敏, 周天成, 张琛等. 三亚典型岸礁礁石表生藻席群体特征及其时空分布规律[J]. 热带海洋学报, 2025,44(04):95-105.
- [11] 覃宾妮. 南海珊瑚礁热压力与精细海温时空格局

的遥感研究[D]. 广西大学, 2023.

基金项目: 浙江水利水电学院国家级大学生创新创业

[12] 卢俊港. 全球变暖影响下的珊瑚白化事件的时空变化特征及其成因[D]. 华东师范大学, 2023.

训练项目, 基于 Sentinel-2 反演的全球第四次珊瑚礁白化灾害研究——以海南西岛为例, 项目编号 202411481022。