

DOI: 10.11964/jfc.20230113888



断枝移植的柳珊瑚对温度、盐度和光照的适应性

赵瑞¹, 梁君^{1,2,3*}, 隋宥珍^{1,2,3}, 胡扬杰¹, 吴天¹, 丁伟康¹, 李雪琰¹

1. 浙江海洋大学海洋与渔业研究所, 浙江省海洋水产研究所, 浙江舟山 316021;

2. 浙江海洋大学, 农业农村部重点渔场渔业资源科学观测实验站, 浙江舟山

316021; 3. 浙江海洋大学, 浙江省海洋渔业资源可持续利用技术研究重点实验室,

浙江舟山 316021

摘要:

【目的】为实现柳珊瑚资源恢复, 移植和增殖是一种有效途径, 前提是需要了解柳珊瑚的生态习性, 本研究开展了温度、盐度和光照三种环境因子实验, 以探明断枝移植的柳珊瑚对不同环境因子的适应性。

【方法】以2021年7月在中街山列岛海洋特别保护区内采集的各80株白色(东海小月柳珊瑚)和红色(东海软柳珊瑚)珊瑚为研究对象。在室内条件下, 利用两点法和Duncan氏法分析了柳珊瑚在4个不同时间点(7:00、11:00、15:00、19:00)、5个不同温度梯度(10、15、20、25和30℃)、6个不同盐度梯度(10、15、20、25、30、35)和4种不同光照类型(蓝光、蓝白光、白光、室内自然光)条件下的存活率和开放等级状况, 揭示柳珊瑚的最佳生存条件。

【结果】①东海小月柳珊瑚和东海软柳珊瑚体内的珊瑚虫均在19:00活跃; ②实验组东海小月柳珊瑚适宜生存温度和盐度分别为21.9~26.9℃和17.7~24.4, 成活率分别为90.8%和85.1%, 且对蓝白光源敏感, 温度和光照开放等级Ⅲ级以上占比分别为57.9%和40.2%; ③实验组东海软柳珊瑚适宜生存盐度为24.4~34.6, 成活率高达95.4%, 对白光敏感, 盐度和光照开放等级Ⅲ级以上占比分别为23.4%和54.1%; ④一旦两种柳珊瑚接受的光照超过适宜范围, 均会呈现烧焦状态。

【结论】两种不同的柳珊瑚在断枝移植的情况下对不同环境因子有一定的适应性, 断枝移植的东海小月柳珊瑚存活率和开放等级状况明显高于东海软柳珊瑚。存活率和开放等级两个参数可以表征柳珊瑚在不同环境因子下的健康状态, 研究结果可为柳珊瑚生态修复和资源养护提供理论依据。

关键词:小月柳珊瑚; 软柳珊瑚; 断枝移植; 温度; 盐度; 光照

柳珊瑚属于刺胞动物门(Cnidaria)花虫亚门(Subphylum Anthozoa), 也称“珊瑚虫纲”)软珊瑚目(Order Alcyonacea), 是骨轴亚目(Suborder Scleraxonia)、全轴亚目(Suborder Holaxonia)和钙轴亚目(Suborder Calcaxonia)的统称^[1]。世界海洋物种名录(World Register of Marine Species)

第一作者: 赵瑞, 从事渔业资源养护与利用研究, E-mail:

983763856@qq.com



通信作者: 梁君, 从事生境修复和资源养护、海洋牧场建设研究, E-mail:

jljiang@zjzu.edu.cn



资助项目: 国家重点研发计划(2020YFD0900804, 2019YFD0901205, 2019YFD0901204); 国家自然科学基金(31702346); 浙江省重点研发计划(2019C02056)

收稿日期: 2023-01-27

修回日期: 2023-07-24

文章编号:

1000-0615(2025)05-059111-15

中图分类号: S 917.4

文献标志码: A

作者声明本文无利益冲突

©《水产学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)
Copyright © Editorial Office of Journal of Fisheries of China (CC BY-NC-ND 4.0)



检索到柳珊瑚共 16 科。珊瑚具有较高的生物多样性和初级生产力, 柳珊瑚是珊瑚的组成部分, 同样也对维持生物多样性和资源生产力有特别价值, 也是环境健康的重要指示物^[2]。近年来, 随着人类活动的加剧及底拖网作业强度的提升, 柳珊瑚的栖息地不断遭受破坏, 生存胁迫日益增加, 其自然种群已呈不断衰退趋势。吴常文等^[3]和 Fujita 等^[4]均提出了柳珊瑚是曼氏无针乌贼 (*Sepiella japonica*) 重要的产卵附着基, 约占自然海区产卵附着物的 60%, 在支撑产卵场功能方面发挥着重要作用。目前, 天然柳珊瑚的保护工作尚未引起足够的重视, 忽视海洋生态系统原生物种自然禀赋的现象明显, 因此, 柳珊瑚移植和增殖工作显得尤为必要。

珊瑚主要以分裂、出芽和珊瑚虫球脱落等方式进行无性繁殖^[5], 该方式技术要求低, 可实施性强。国内外学者利用无性繁殖技术对石珊瑚移植开展了相关的研究, 我国珊瑚断枝培育主要应用于造礁石珊瑚上, 未见应用于软珊瑚上的报道。有研究证明了珊瑚移植技术是修复珊瑚礁生态系统的有效技术^[6-8], 但并不是所有的珊瑚都适合此技术, 例如, 块状珊瑚 [橙黄滨珊瑚 (*Porites lutea*)、秘密角蜂巢珊瑚 (*Favities abdita*)、遁形陀螺珊瑚 (*Turbinaria peltata*) 和柱状角孔珊瑚 (*Goniopora columna*)] 和叶状珊瑚 [十字牡丹珊瑚 (*Pavona decussata*)] 移植效果差^[9-11]。因此, 要想提高珊瑚资源修复效果, 需要筛选符合移植条件的珊瑚种类, 摸清适宜的生态因子, 并对断枝珊瑚的生长发育情况进行深入研究^[12]。国内外学者对柳珊瑚的研究多聚焦在分子系统^[1]、化学成分^[13-15]、种类分布^[16]、形态^[17]等方面, 但哪些环境因子影响到柳珊瑚

的生存和栖息却鲜见报道。有研究证明温度是影响柳珊瑚存活和生长的重要环境因子, 但未界定适宜的温度范围, 且关于盐度和光照是否为柳珊瑚生长的重要环境指标并未提及^[5]。开展柳珊瑚对温度、盐度和光照适应性的基础研究将有利于揭示柳珊瑚的生态习性。

本研究以中街山列岛海洋特别保护区的两种柳珊瑚为对象, 通过室内人为控制温度、盐度和光照, 探索断枝移植对柳珊瑚存活和生长的影响, 摸清柳珊瑚与不同生态环境因子之间的关系。通过柳珊瑚断枝移植的研究, 既可为柳珊瑚生态修复和资源养护提供理论依据, 又有助于恢复头足类资源。

1 材料与方

1.1 实验材料

柳珊瑚样本来源和暂养 实验样本源于浙江省舟山市中街山列岛海洋特别保护区 (30°10'N, 122°41'E)。2021 年 7 月 12 日在中街山列岛海域进行潜水采集, 白色和红色柳珊瑚各 80 株 (图 1, 星号为采集点)。样品采集、处理和分析等均按照《海洋调查规范》(第 6 部分海洋生物调查 GB/T 12763.6—2007)^[18]。通过前期骨针和分子生物学同时鉴定, 发现这 2 种柳珊瑚分别为小月柳珊瑚属 (*Menella* sp.) 和软柳珊瑚属 (*Suberogorgia* sp.) (图版 I)。由于柳珊瑚分类系统紊乱, 送海南大学和中国科学院南海海洋研究所检测, 仍无法鉴定到种。不排除与福建东山海域的优势种小月柳珊瑚是同一种^[16]。本实验将两种柳珊瑚称为东海小月柳珊瑚和东海软柳珊瑚。实验过程中操作人员严格遵守动

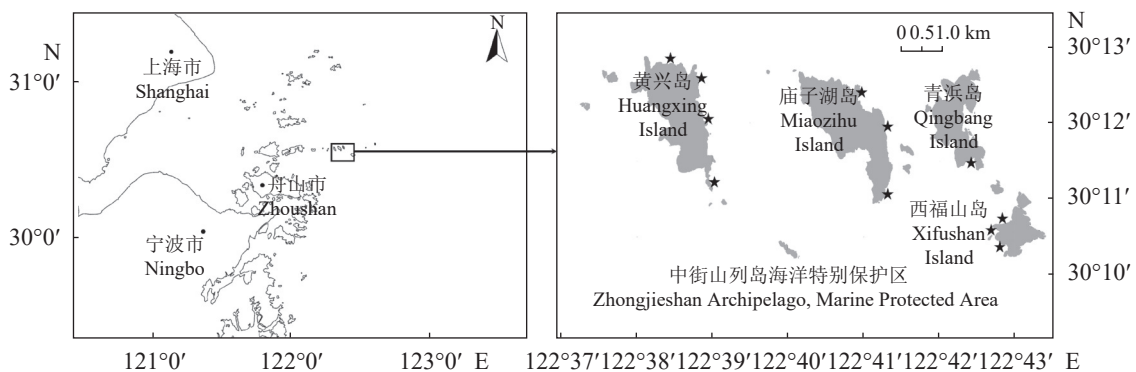
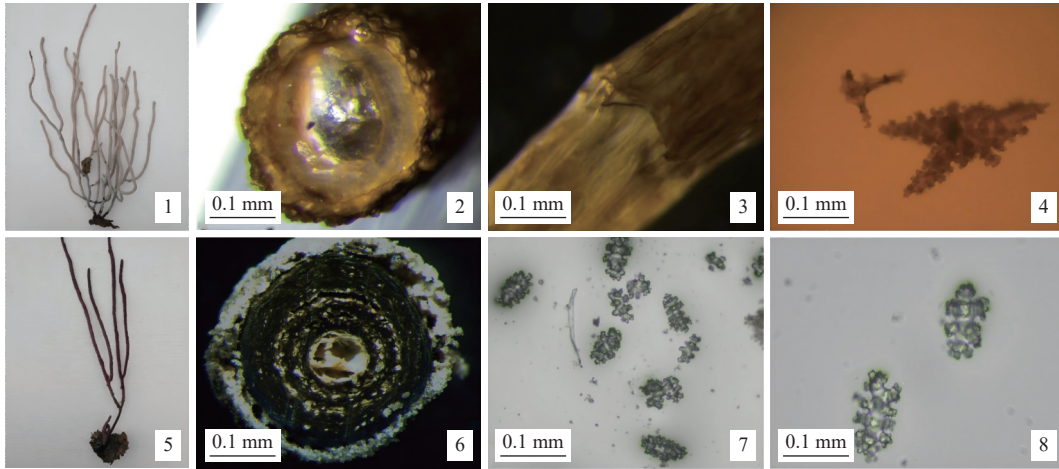


图 1 柳珊瑚采样区域和站位分布

Fig. 1 Sampling area and distribution of stations



图版 I 中街山列岛海域采集的柳珊瑚及其骨针鉴定

1. 东海小月柳珊瑚, 2. 东海小月柳珊瑚中轴骨横截面(中空, 全轴), 3. 东海小月柳珊瑚中轴骨表面, 4. 东海小月柳珊瑚共肉表层骨针, 5. 东海软柳珊瑚, 6. 东海软柳珊瑚中轴骨横截面(实心, 骨轴), 7-8. 东海软柳珊瑚共肉表层骨针。

Plate I Identification of gorgonian coral and its bone needle collected from Zhongjieshan Islands sea area

1. *Menella* sp., 2. cross section of axis bone of *Menella* sp. (hollow full axis), 3. surface of central axis bone of *Menella* sp., 4. joint meat surface bone needle of *Menella* sp., 5. *Suberogorgia* sp., 6. cross section of axis bone of *Suberogorgia* sp. (solid bone axis), 7-8. joint meat surface bone needle of *Suberogorgia* sp.

物伦理规范, 并按照实验动物福利及伦理各项规章制度执行。

将活体柳珊瑚迅速放入直径 3 m、高 1 m 的圆形暂养桶内, 运输期间采用气石充氧并进行避光处理, 转至室内暂养 7 d。为了消除自然海水中营养盐、浮游生物等生态因子对实验带来的干扰, 暂养期间用海水晶(蓝鸿星速溶海水晶, 江西海鼎科技有限公司)配比海水, 连续充气, 每天投喂轮虫和德国 Tropic Marin 珊瑚饲料 2 次, 每 3 天换 1 次水。

实验样本前处理 ①亲本挑选。挑选健康完整, 颜色鲜明的柳珊瑚, 植株高度范围为 300~450 mm, 分枝 2~4 个。

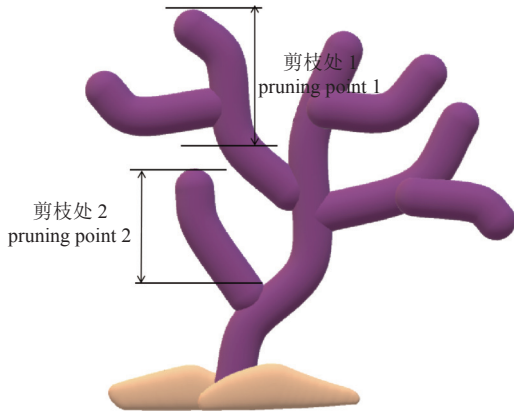
②亲本驯化。潜水员采集柳珊瑚出水后, 会短暂暴露在空气中, 珊瑚虫会立刻收缩。在实验之前要进行驯化, 驯化主要分为环境适应和饵料过渡两部分。

经长途运输的柳珊瑚受到外界刺激, 会产生应激反应。为确保柳珊瑚维持在良好状态, 将亲本缓慢放入 700 mm×300 mm×480 mm 的有机玻璃实验箱内暂养, 其间控制水体环境各项主要指标接近于自然海域(水温控制在 26~27℃, 盐度保持在 27~28, pH 维持在 7.8~8.5, DO 维持在 7.5~8.3 mg/L)。实验箱底部不放砂砾石、混凝土等物质, 保持水体清洁。利用 GoPro

HERO 7 型相机拍摄珊瑚虫开放情况, 肉眼观察柳珊瑚死亡情况。

每天早晚均同时投喂轮虫和德国 Tropic Marin 珊瑚饲料, 进行饵料过渡, 保证水中饵料充足, 投饵前将饵料充分混合。选择淡黄色、肉眼可见的人工培养轮虫, 投喂时顺着排水口将 2 g 轮虫稀释后滴入实验箱中。德国 Tropic Marin 珊瑚饲料和海水按 6 : 1 的重量比进行稀释, 搅拌后放置 1~3 min, 顺着排水口流入, 此时过滤系统处于关闭状态。投喂时间不超过 10 min, 结束后开启过滤系统。待亲本完全适应环境和饵料后, 开始进行断枝移植(亲本的珊瑚虫开始正常开放, 不再处于紧闭状态)。

③断枝移植。获取有效的断枝进行移植是高效繁殖柳珊瑚的重要步骤, 故在实际操作时选择对亲本危害较小的部位进行剪枝。在移植的前 3 d 天停止喂食, 待珊瑚虫应激反应减弱或触手反应不强烈时进行剪枝。利用消毒棉球将剪刀、培养皿擦拭消毒, 在实验箱内进行剪枝, 每次剪枝之后都需要对剪刀进行二次消毒。剪枝选择主枝茁壮且分枝点较多的部位^[19]。每株亲本均采用 2 种剪枝方式。有分枝: 剪枝点应当在分枝基部以下 30 mm 处(图版 II, 剪枝处 1)。无分枝: 选择共肉组织完整且鲜艳的无分枝株或主枝顶端(图版 II, 剪枝处 2)。剪枝部



图版 II 柳珊瑚剪枝示意图

Plate II Pruning diagram of gorgonian coral

位不宜过长或过短, 否则会在实验观察中产生误差 (防止后期珊瑚虫开放等级计算存在误差)。以上 2 种方式的每个断株长度为 50~80 mm, 每一原始株可进行多次剪枝。

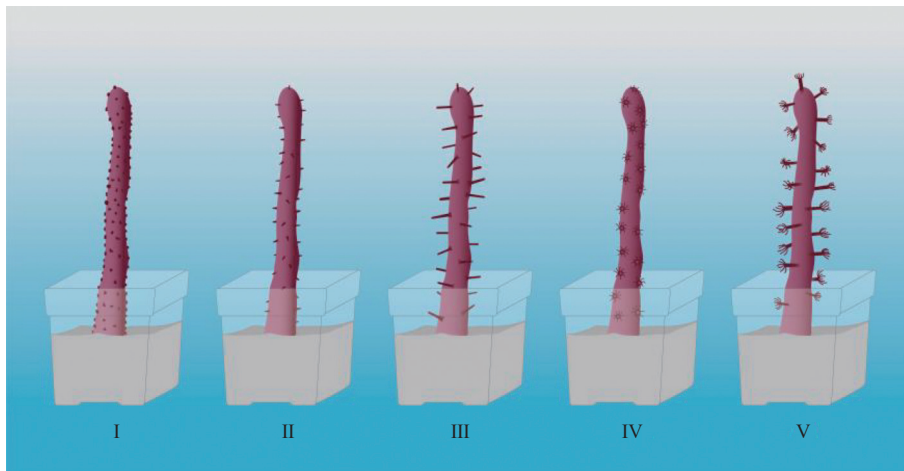
④基底筛选和断枝固定。选用白色透明塑料方形盆和速干水泥灰作为固定断枝柳珊瑚的基底。塑料方形盆规格为 50 mm×80 mm×70 mm, 重量约 19 g, 实验共需 840 个。速干水泥灰凝固速率较快, 10~12 min 凝固成型。将稀释搅拌均匀的速干水泥灰置于塑料方形盆内部, 水泥厚度为 50 mm。为减少柳珊瑚干露时间, 第 8~9 分钟时, 利用镊子将断枝柳珊瑚迅速插入速干水泥灰中, 插入深度 20 mm, 待凝固后迅速放入实验箱内。静置至第 2 天开始投饵, 进入正式实验。实验过程中柳珊瑚可能超过自然海域范围阈值导致死亡, 不同实验组和对照组

的柳珊瑚基底数量为实际数量的 120 %, 备份的柳珊瑚放入暂养桶内。

1.2 实验方法

柳珊瑚存活和开放程度的界定 以柳珊瑚是否伸出触手为判定其存活或死亡的依据^[20], 若 24 h 触手未伸出, 且触手部位颜色变浅和出现褪皮现象, 表皮分泌黏液以及共肉组织脱落, 则判定该株柳珊瑚死亡。刘旭等^[21]发现珊瑚触手收缩是珊瑚响应环境干扰的重要方式。目前, 国内外对柳珊瑚触手开放等级未作定义, 柳珊瑚的开放情况可以作为对不同环境因子适应性的外部表征, 本研究在实验过程中通过拍摄大量视频和图片观察, 将柳珊瑚体内珊瑚虫触手开放情况划分为 5 个等级 (图版 III)。即珊瑚虫在共肉组织内有明显的突起为 I 级; 肠腔部位从共肉组织伸出 1/2 且触手紧闭为 II 级; 肠腔部位从共肉组织内全部伸出, 触手不绽放为 III 级; 珊瑚虫触手从共肉组织内伸出并全部绽放, 但肠腔部位未从共肉组织内伸出为 IV 级; 珊瑚虫肠腔部位从共肉组织内完全伸出且触手全部绽放为 V 级。

温度和盐度实验 为了研究柳珊瑚对不同温度和盐度敏感性的差异性, 以间距 5 设置实验, 分别为 10、15、20、25 和 30 °C, 以及盐度 10、15、20、25、30、35 (近 5 年监测中街山列岛海域周年温度和盐度的阈值范围分别为 11.40~29.98 °C 和 8.70~34.54, 周年平均温盐度分别为 19.45 °C 和 28.41, 不排除特殊年份不在阈值范围的情况)。将柳珊瑚样本分为实验组



图版 III 柳珊瑚开放等级划分

Plate III Open classification of gorgonian corals

和对照组, 实验组为剪枝之后的断枝柳珊瑚且在不同温盐梯度下进行实验, 对照组为完整柳珊瑚。保证每个实验隔间可进行水体循环, 5个梯度同时进行, 实验历时 5 d。为防止温度剧变对柳珊瑚造成不可逆伤害, 每个梯度的温度和盐度调节速率分别控制在 $\pm 2^\circ\text{C}/4\text{ h}$ 和 $\pm 2/4\text{ h}$, 达到各组预设温度和盐度后开始实验。通过可调节温度的恒凡 22 050 W 风冷式工业冷水机(东莞市恒凡节能设备有限公司)进行温度调控, 温度和盐度的实测值采用衡欣 AZ86031 多功能水质检测仪(东莞市衡欣仪表有限公司)检测。

每个梯度实验期间保持水流处于循环状态, 充气保持水中的 DO 大于 6 mg/L。由于实验过程中室内光线差, 夜晚拍摄柳珊瑚无法确切观察珊瑚虫开放状态, 为了保证拍摄时间间隔一致, 实验过程中每天 7:00 (早晨)、11:00 (中午)、15:00 (下午) 和 19:00 (傍晚) 进行 4 个不同时间点的观察, 记录每组柳珊瑚开放情况, 每日吸污以防止水中氮、磷等营养盐增多, 污染水质。实验期间循环水实验箱每天开启蛋白质分离过滤器, 每 2 天开启蓄水池紫外线杀菌灯, 进行杀菌处理, 并同步监测柳珊瑚死亡情况。

光照实验 中街山列岛海洋保护区柳珊瑚主要栖息深度为 9~12 m, 自然海域水面正午时光照值为 11 000 lx, 因早晚太阳光照射偏弱, 且随着水深增加, 光线均有一定的衰减^[19]。实验使用直读式数字照度仪(希玛 AS813)获取光照值。本研究主要采用了 4 种光源^[19]: ①蓝色 25 W 荧光灯(700~1 250 lm/W); ②蓝白 35 W 荧光灯管(800~3 200 lm/W); ③150 W 金属卤化物灯(HQI)(65~140 lm/W); ④室内自然光照。前 3 种光源为实验组, 实验组所需要的光源数量共 48 个; 对照组柳珊瑚共需 32 株, 系室内珊瑚景观生态通常采用的自然光源(主要用于补充珊瑚体内虫黄藻所需要的光源, 保证珊瑚颜色鲜艳), 光照实验方法与温度基本一致, 但要用黑色遮光布将各组隔开, 以免受到其他光源的影响。4 种光源同时进行, 实验历时 5 d。实验期间温度为 26~27 °C, 盐度为 27~28。

1.3 数据分析

数据预处理 每次观察间隙采用佳能相机 [EOS90D(CN)18200IS] 进行拍照, GoPro HERO 7 进行摄像, 建立可随时调取的可追溯

数据库; 利用 SPSS 26.0 对 T (温度)、 S (盐度) 和 L_x (光照) 按天求取平均值。

生存温度、盐度和光照的界定 通过开放等级的相对值 P 表征柳珊瑚对温度、盐度和光照的适应能力, 表达式:

$$P = (\text{实验组开放等级} / \text{对照组开放等级}) \times 100\% \quad (1)$$

适宜生存温度、盐度和光照 开放等级为 III 级的温度、盐度和光照作为柳珊瑚的适宜生存温度、盐度和光照。采用两点法^[22] 计算适宜生存温度、盐度和光照, 公式:

$$L_{T50\%} = T_1 + [(P_1 - 50\%) / (P_1 - P_2)] \times (T_2 - T_1) \quad (2)$$

$$L_{S50\%} = S_1 + [(P_1 - 50\%) / (P_1 - P_2)] \times (S_2 - S_1) \quad (3)$$

$$L_{Lx50\%} = L_{x1} + [(P_1 - 50\%) / (P_1 - P_2)] \times (L_{x2} - L_{x1}) \quad (4)$$

式中, T_1 、 T_2 、 S_1 、 S_2 和 L_{x1} 、 L_{x2} 分别为柳珊瑚存活率接近 50% 且开放等级为 III 级时对应的最高和最低的温度、盐度和光照; P_1 、 P_2 为开放等级为 III 级时的相对值。

最佳生存温度、盐度和光照 采用 Duncan 氏法^[23] 对各实验组柳珊瑚的开放等级 I~V 进行多重比较, 将没有显著差异 ($P > 0.05$) 的最优几个组对应的温度值、盐度值和光照值或与其他组有显著差异 ($P < 0.05$) 的 1 个最优组的温度值、盐度值和光照值作为柳珊瑚最佳生存温度、盐度和光照^[23]。

广义相加模型 (generalized additive models, GAM) 是以一种自由度更高的方式去拟合数据的方法, 根据原始数据自动选择合适的多项式, 能直接反映响应变量和多个解释变量之间独立的非线性关系^[24-25], 表达式:

$$g(\mu) = \alpha + \sum_{i=1}^n f_i(x_i) + \varepsilon \quad (5)$$

式中, α 为函数截距; x_i 为各解释变量; $f_i(x_i)$ 为各解释变量的任意单变量函数; ε 为残差, 与 x_i 无关, 服从正态分布^[25]。本研究使用 GAM 模型分析断枝移植柳珊瑚开放等级与各环境因子之间的关系, 以验证与两点法和 Duncan 氏法的结果是否一致。

本实验数据描述性统计采用平均值 \pm 标准差表示, 使用 SPSS 26.0 统计软件对柳珊瑚各

项数据进行单因素方差分析, 使用 R4.0.2 软件进行绘图。

2 结果

2.1 不同环境因子下实验组柳珊瑚存活率

实验组东海小月柳珊瑚在温度为 25 °C 时, 存活率达到 90.8%, 开放等级Ⅲ级以上占比 57.9%; 盐度为 20.4 时, 存活率达到 85.1%; 在蓝光下存活率达到 82.8%。实验组东海软柳珊瑚在温度为 25 °C 时存活率为 60%; 盐度为 30.4 时, 存活率为 95.4%, 开放等级Ⅲ级以上占比 23.4%; 在白光下存活率达到 90.7% (图 2)。

温度为 25 °C 时, 实验组东海小月柳珊瑚存活率高于实验组东海软柳珊瑚。盐度为 25 时, 实验组东海小月柳珊瑚与实验组东海软柳珊瑚存活率大致相同; 盐度为 35 时, 实验组东海软柳珊瑚存活率大于东海小月柳珊瑚。在不同光照下, 实验组东海软柳珊瑚的存活率却低于实验组东海小月柳珊瑚。

2.2 柳珊瑚对温度的适应性

温度过高或过低对东海小月柳珊瑚和东海软柳珊瑚均产生不利影响。预实验发现, 10 °C 时, 实验组和对照组的两种柳珊瑚均产生了明显的负反馈效应, 如触手紧缩、共肉组织脱落和中轴骨裸露等现象。正式实验时将最低阈值调整为 12 °C。为了保证实验数据的真实性, 12 °C 以下柳珊瑚的存活率和开放等级不计入数据统计中。此外, 实验组和对照组的两种柳珊瑚在 30 °C 时, 第 2 天均出现了触手紧缩、表皮产生黏液的现象。第 3 天发现, 实验组东海小月柳珊瑚出现了体表颜色变暗、共肉组织脱落和中轴骨裸露的现象; 东海软柳珊瑚颜色变浅, 触手全部紧缩, 体表出现一层褐色薄膜, 但未出现共肉组织脱落和中轴骨露出的现象。同时, 实验组和对照组的东海小月柳珊瑚在 19:00 开放等级Ⅲ级以上的占比分别为 45.3% 和 59.3%; 实验组东海软柳珊瑚主要在 15:00 开放等级高, 开放等级Ⅲ级以上的占比为 28.6%, 对照组东海软柳珊瑚主要在 11:00—15:00, 柳珊瑚开放等级为Ⅲ级以上的占比均为 27.5%。

结果显示, 温度、盐度和光照对柳珊瑚的有分枝和无分枝无显著差异 ($P>0.05$), 因此在

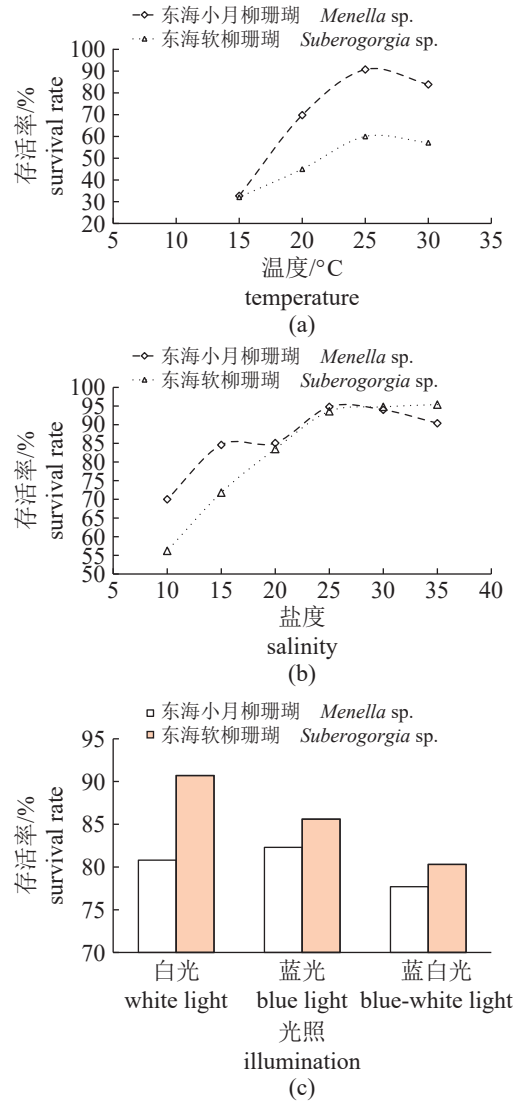


图 2 柳珊瑚在不同环境下的存活率

Fig. 2 Survival rates of gorgonian corals in different environments

数据统计分析时, 进行归一化处理。GAM 模型分析结果 (图 3, 图 4) 进一步验证了两点法和 Duncan 氏法的结果 (表 1)。

实验组东海小月柳珊瑚的适宜生存温度为 21.9~26.9 °C, 开放等级Ⅲ级以上占比 57.8%, 26.6 °C 为最佳生存温度 (图 3)。对照组的适宜生存温度为 20.2~21.9 °C, 开放等级Ⅲ级以上占比 60.4%, 21.4 °C 为最佳生存温度。实验组东海软柳珊瑚的适宜生存温度为 20.2~26.9 °C, 开放等级Ⅲ级以上占比 27.7%。当处于适宜生存温度时, 实验组东海软柳珊瑚比东海小月柳珊瑚更快促进伤口愈合, 共肉组织进行分裂, 在剪枝的伤口处形成一层乳白色薄膜, 之后薄膜

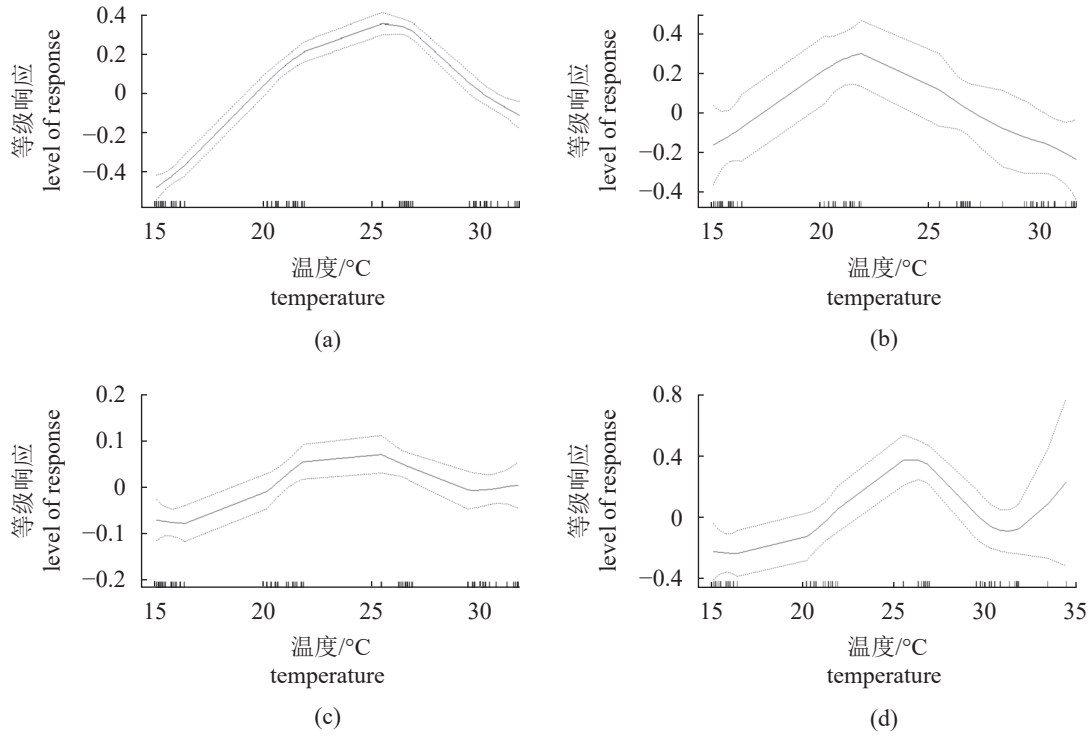


图 3 不同温度下柳珊瑚开放等级变化趋势

(a) 东海小月柳珊瑚实验组, (b) 东海小月柳珊瑚对照组, (c) 东海软柳珊瑚实验组, (d) 东海软柳珊瑚对照组, 图 4 同。

Fig. 3 Trends in open grades of gorgonian corals under different temperature

(a) *Menella* sp. experimental group, (b) *Menella* sp. control group, (c) *Suberogorgia* sp. experimental group, (d) *Suberogorgia* sp. control group, the same as Fig.4.

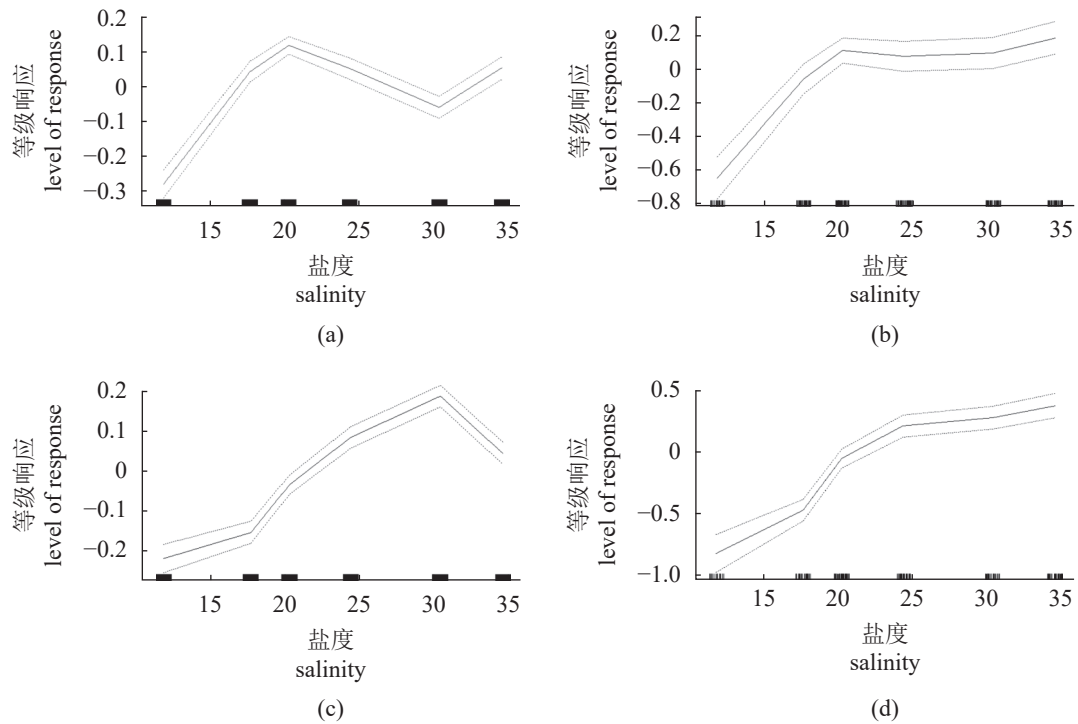


图 4 不同盐度下柳珊瑚开放等级变化趋势

Fig. 4 Trends in the open grade of gorgonian corals under different salinity

表 1 通过两点法和 Duncan 氏法计算柳珊瑚对温度、盐度的适应性
Tab. 1 Gorgonian corals suitability statistics for temperature and salinity

属性 property	指标 indicator	东海小月柳珊瑚 <i>Menella</i> sp.		东海软柳珊瑚 <i>Suberogorgia</i> sp.	
		实验组 experimental group	对照组 control group	实验组 experimental group	对照组 control group
温度/ $^{\circ}\text{C}$ temperature	适宜生存温度	21.9~26.9*	20.2~21.9*	20.2~26.9*	21.1~26.9
	最佳生存温度	26.6	21.4	26.8	26.6
盐度 salinity	适宜生存盐度	17.7~24.4*	17.7~24.4	24.4~34.6*	20.4~34.6*
	最佳生存盐度	20.4	24.4	30.4	24.4

注：“*”代表差异显著， $P < 0.05$ ，下同。

Notes: “*” represents significance, $P < 0.05$, the same below.

会缓慢变厚，但无珊瑚虫。26.8 $^{\circ}\text{C}$ 是东海软柳珊瑚的最佳生存温度，此时东海软柳珊瑚会产生出芽现象，初始生长迅速，最初的芽尖为 2~4 mm，经过 3~4 d，芽尖长度迅速增至 5~15 mm，之后生长缓慢，基本保持不变。对照组的适宜生存温度为 21.1~26.9 $^{\circ}\text{C}$ ，开放等级 III 级以上占比 43.3%，26.6 $^{\circ}\text{C}$ 为最佳生存温度。

对两种柳珊瑚的温度进行统计分析，开放等级呈显著差异 ($P = 0.001 < 0.05$)。通过 GAM 模型分析表明，实验组和对照组的东海小月柳珊瑚和东海软柳珊瑚在适宜生存温度内均呈现正反馈 (level of response > 0)，经分析比较发现，东海小月柳珊瑚比东海软柳珊瑚更耐低温。

2.3 柳珊瑚对盐度的适应性

当盐度为 10 时，实验组两种柳珊瑚均受到胁迫，触手开始收缩，珊瑚虫紧闭于共肉组织内，东海软柳珊瑚肉眼可见颜色变浅，共肉组织脱落或变为粉末，最后死亡。东海小月柳珊瑚共肉组织变为浅黄色，甚至出现粉色斑点，最终变为黄色粉末脱落死亡。对照组的两种柳珊瑚在盐度为低盐状态时出现负反馈现象。东海小月柳珊瑚共肉组织颜色变黄但未出现粉色斑点且未裸露中轴骨。东海软柳珊瑚可见共肉组织颜色变浅但未裸露中轴骨，两种柳珊瑚均表现为仅有少量的珊瑚虫伸出触手。此外，实验组和对照组的两种柳珊瑚均在 19:00 开放等级较高，东海小月柳珊瑚开放等级为 III 级以上的占比分别为 46.2% 和 37.2%；东海软柳珊瑚开放等级为 III 级以上的占比分别为 13% 和 32.6%。

两点法计算分析可知，以实验周期内柳珊瑚有 50% 存活率的盐度作为临界盐度，将高、

低两端临界盐度之间的盐度范围作为柳珊瑚的适宜生存范围，同时通过柳珊瑚开放等级 I~V 多重比较，发现开放等级为 III 时，柳珊瑚开放占比最多。实验组东海小月柳珊瑚的适宜生存盐度为 17.7~24.4，开放等级 III 级以上占比 42%，20.4 为最佳生存盐度 (图 4)；对照组适宜生存盐度为 17.7~24.4，开放等级 III 级以上占比 30.5%，24.4 为最佳生存盐度。实验组东海软柳珊瑚适宜生存盐度为 24.4~34.6，开放等级 III 级以上占比 23.4%，在 30.4 时达到最佳生存盐度；对照组适宜生存盐度为 20.4~34.6，开放等级 III 级以上占比 14%，24.4 为最佳生存盐度。

对两种柳珊瑚的盐度进行统计分析，开放等级呈显著差异 ($P = 0.016 < 0.05$)。通过 GAM 模型可知，实验组和对照组的两种柳珊瑚在适宜生存盐度内均呈现正反馈 (level of response > 0)，但实验组的东海小月柳珊瑚耐盐性低于东海软柳珊瑚。

2.4 柳珊瑚对光照的适应性

为了找到两种柳珊瑚对不同光照的适应性，利用 GAM 模型分析结果 (图 5) 进一步验证了两点法和 Duncan 氏法的结果 (表 2)。

实验组东海小月柳珊瑚更偏向于蓝白光和自然光。在蓝光下，光照值在 12 830~14 410 lx 为适宜光照，开放等级 III 级以上占比 27%，光照值为 13 850 lx 时为最佳光照。在蓝白光下，光照值在 40 310~54 740 lx 为适宜光照，开放等级 III 级以上占比 40.2%，光照值为 41 510 lx 时为最佳光照，一旦超过适宜光照范围，东海小月柳珊瑚体表颜色逐渐变暗，触手紧缩，紧闭于共肉组织，萼部呈现焦黄色，严重时体表呈现“烧焦”状态，肉眼可见柳珊瑚体表的珊瑚虫

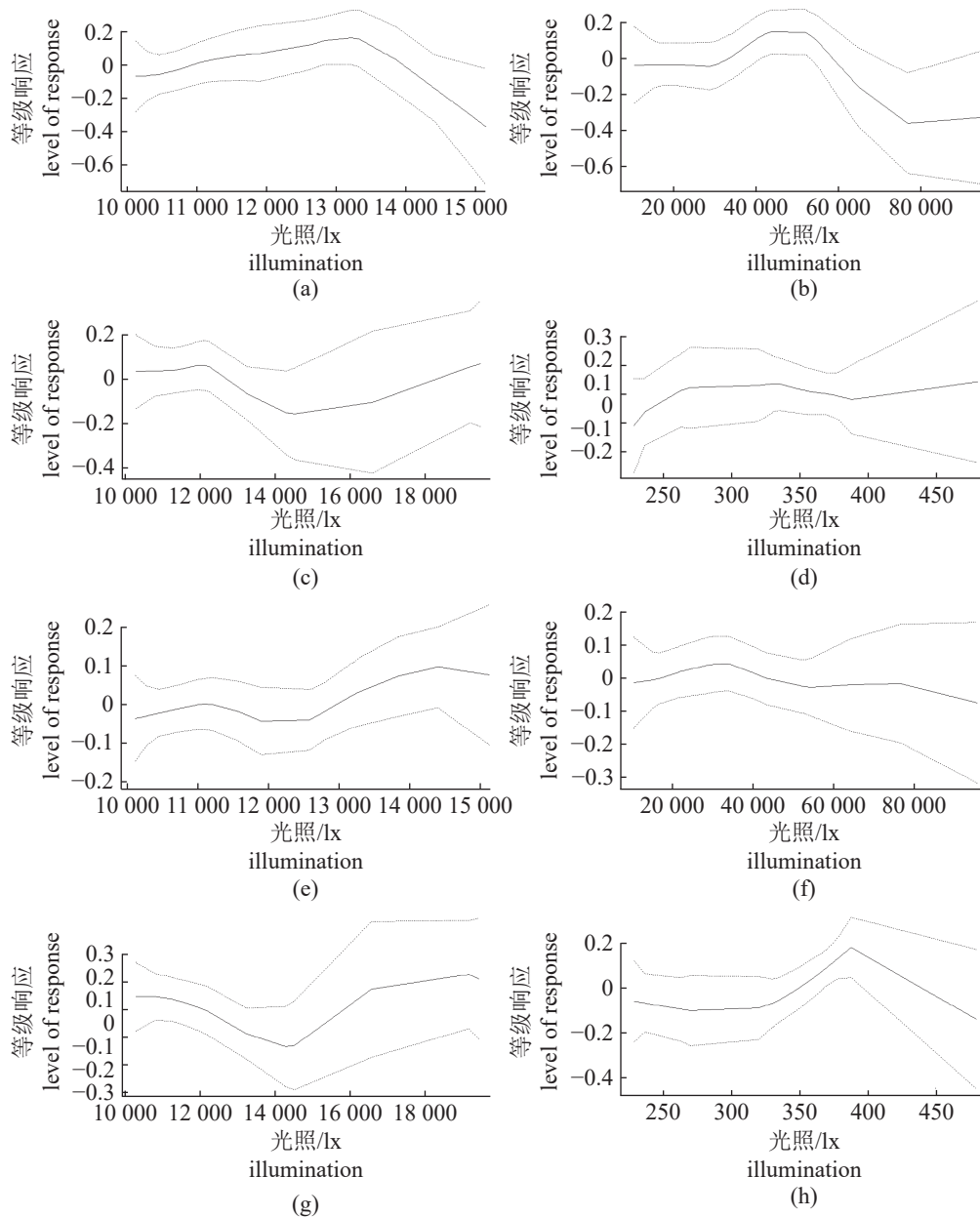


图 5 不同光照下柳珊瑚开放等级变化趋势

(a) 东海小月柳珊瑚实验组蓝光, (b) 东海小月柳珊瑚实验组蓝白光, (c) 东海小月柳珊瑚实验组白光, (d) 东海小月柳珊瑚对照组室内自然光, (e) 东海软柳珊瑚实验组蓝光, (f) 东海软柳珊瑚实验组蓝白光, (g) 东海软柳珊瑚实验组白光, (h) 东海软柳珊瑚对照组室内自然光。

Fig. 5 Trend chart of gorgonian open grades under different illumination conditions

(a) *Menella* sp. blue light experimental group, (b) *Menella* sp. blue and white light experimental group, (c) *Menella* sp. white light experimental group, (d) *Menella* sp. indoor natural light control group, (e) *Suberogorgia* sp. blue light experimental group, (f) *Suberogorgia* sp. blue and white light experimental group, (g) *Suberogorgia* sp. white light experimental group, (h) *Suberogorgia* sp. indoor natural light control group.

明显减少。在白光下, 适宜光照值为 10 310~13 260 lx, 开放等级Ⅲ级以上占比 22.2%, 光照值 12 220 lx 时为最佳光照。对照组东海小月柳珊瑚光照值在 320~368 lx 为适宜光照, 开放等级Ⅲ级以上占比 48.1%; 光照值为 335 lx 时为最佳光照。实验组东海软柳珊瑚更偏向于白光

且敏感度更高。蓝光下, 适宜光照值为 13 850~15 140 lx, 开放等级Ⅲ级以上占比 28.1%, 当光照值为 14 410 lx 时为最佳光照。蓝白光下, 适宜光照值为 21 300~43 730 lx, 开放等级Ⅲ级以上占比 31.8%, 当光照值为 34 510 lx 时为最佳光照, 一旦超过适宜光照范围, 东海软柳珊瑚

表 2 通过两点法和 Duncan 氏法统计分析柳珊瑚在 4 种不同光照下的适应性

Tab. 2 Suitability analysis for gorgonian under 4 different types of light using the two-point and Duncan's methods

类别 category	属性 property	指标 indicator	东海小月柳珊瑚 <i>Menella</i> sp.	东海软柳珊瑚 <i>Suberogorgia</i> sp.
实验组 experimental group	蓝光	适宜光照值	12 830~14 410	13 850~15 140
		最佳光照值	13 850	14410
	蓝白光	适宜光照值	40 310~54 740*	21 300~43 730
		最佳光照值	41 510	34 510
	白光	适宜光照值	10 310~13 260	16 000~19 450
		最佳光照值	12 220	16 580
对照组 control group	室内自然光	适宜光照值	320~368*	358~480
		最佳光照值	335	388

体表颜色逐渐变浅, 触手紧缩, 紧闭于共肉组织, 严重时也呈现“烧焦”状态。白光下, 适宜光照值为 16 000~19 450 lx, 开放等级Ⅲ级以上占比 54.1%; 最佳光照值为 16 580 lx。对照组东海软柳珊瑚光照值在 358~480 lx 区间为适宜光照, 开放等级Ⅲ级以上占比 26.6%, 当光照值为 388 lx 时为最佳光照。根据实验观察结果可知, 实验组和对照组的东海小月柳珊瑚在 19:00, 室内自然光源下开放等级较高, 开放等级为Ⅲ级以上的占比 55.4%, 实验组和对照组的东海软柳珊瑚在 7:00, 蓝光下开放等级较高, 开放等级为Ⅲ级以上的占比 46.2%。

对不同光照类型进行了分析, 发现开放等级呈显著性 ($P=0.028<0.05$)。GAM 模型分析可知, 蓝光下, 东海软柳珊瑚的适应能力略优于东海小月柳珊瑚; 蓝白光下, 东海小月柳珊瑚光照适应能力远超东海软柳珊瑚; 白光下, 东海小月柳珊瑚和东海软柳珊瑚都表现出了负反馈, 均呈先降后升, 东海软柳珊瑚对白光的适应能力远高于东海小月柳珊瑚; 室内自然光照下, 东海小月柳珊瑚的光照适应能力优于东海软柳珊瑚 (图 5)。

3 讨论

中街山列岛海洋特别保护区 pH 值常年较稳定, DO 可达到 6 mg/L, 既满足柳珊瑚生存条件, 又符合一类海水水质标准^[26], 故本研究未开展 pH 和 DO 的适应性分析。本研究发现, 温度、盐度和光照对断枝移植的柳珊瑚生长存活和开放程度的影响非常明显, 断枝移植的柳珊瑚会随着外界环境的变化而进行生理性补偿,

生长与温度和盐度呈显著相关性。当利用温度、盐度或光照单一因子进行控制变量法, 其中一个因子控制在合适范围, 能反映出另一因素对柳珊瑚的影响。柳珊瑚对温度、盐度和光照的适应性与所处的生境有关。断枝移植的柳珊瑚受环境胁迫时会进行自我保护和适应, 在胁迫强度较轻且持续时间较短的情况下, 断枝移植的柳珊瑚可以通过生理上的保护机制以适应环境的变化。

3.1 断枝柳珊瑚与温度的关系

本研究发现断枝东海小月柳珊瑚在 30 °C 时, 出现了负反馈现象, 这可能是柳珊瑚发生白化的前期征兆。温度是影响柳珊瑚生存的重要环境因子^[5]。有研究证实了不同种类柳珊瑚对温度的敏感性不同, 温度升高会对柳珊瑚体内的虫黄藻产生热胁迫, 一旦超过阈值, 体内共生的虫黄藻会发生细胞凋亡、坏死等现象, 受损的虫黄藻被珊瑚虫驱逐, 体表颜色变浅, 其共肉组织脱落, 严重时会出现白化现象^[27-28]。此外, 不同种类柳珊瑚之间的上限温度也不完全相同, 即使是同一柳珊瑚物种的上限温度, 也需要通过实验确定^[27]。本研究发现在适宜生存温度范围内, 断枝东海小月柳珊瑚耐温性高于断枝东海软柳珊瑚且敏感性更强, 主要表现在实验组和对照组之间最佳生存温度的差异, 可能是断枝株需要更高的温度才能启动伤口修复机制。这种伤口修复机制表现为柳珊瑚能更快速促进伤口愈合, 推测可能有两点原因: 其一, 利用海水晶配比海水, 一定程度上避免了藻类、细菌、微生物等刺激柳珊瑚断枝处, 且实验过程中定期对海水进行杀菌处理, 避免伤

口腐烂。其二, 适宜的温度促进柳珊瑚体内珊瑚虫的活性, 刺激共肉组织快速分裂, 从而实现了自我修复。该伤口修复机制也体现在陆生植物甜瓜上, 合适的高温在甜瓜愈合期可促进伤口愈合, 有利于根系的发育^[29]。此外, 实验组东海软柳珊瑚出芽现象, 可能由于温度的改变, 导致柳珊瑚产生“错觉”认为其温度达到了侧枝出芽的条件, 珊瑚虫的活性得到有效激发, 增强了柳珊瑚种群对环境条件的适应力。这一现象在茶树的扦插苗上得到证实, 在高温条件下, 会促使根系发育^[30]。

3.2 断枝柳珊瑚与盐度的关系

本研究发现东海软柳珊瑚耐盐性更高, 而且实验组盐度为 30.4, 是最佳生存盐度, 远高于对照组, 可能与温度一样也存在着伤口修复机制。柳珊瑚通常对高盐度海水具有一定的适应性, 例如, 波斯湾的柳珊瑚在盐度为 42 时, 依然能较好地生长^[31]。此外, 低盐环境会对珊瑚造成严重影响^[32], 盐度在小范围内波动, 短时间内不会导致珊瑚白化死亡, 但由于珊瑚不具备调节渗透压的能力, 一旦长期受到低盐胁迫, 会抑制珊瑚幼虫的附着^[33], 最终导致珊瑚白化^[34]。本研究发现, 盐度约为 10 时, 两种柳珊瑚在低盐环境中受到胁迫, 均表现为触手收缩、颜色变化、共肉组织脱落或变为粉末, 甚至导致死亡。此外, 低盐环境也影响了柳珊瑚的分布, 例如在盐度较低的淡水河口附近, 一般就很少发现柳珊瑚^[16]。珊瑚正常生长盐度范围一般为 27~40^[31], 这也能解释中街山列岛海域发现一定数量的柳珊瑚, 该海域是近海和外海的过渡区域, 位于河口延伸带, 不完全受河口低盐环境控制^[35]。

3.3 断枝柳珊瑚与光照的关系

本研究发现东海小月柳珊瑚体内的虫黄藻偏向于蓝白光源, 东海软柳珊瑚偏向于白光。光照也会影响柳珊瑚的生长和分布, 在合适的光照强度下, 可以提高柳珊瑚的生长^[36]。柳珊瑚体内的共生虫黄藻通过吸收海水中的阳光进行光合作用, 可将所吸收的 95% 的碳转移至珊瑚虫中, 促进共肉组织的分裂, 同时为柳珊瑚提供必不可少的能源^[34]。光谱对珊瑚的光生物学、生理学和生长都有重要影响^[37-38]。虫黄藻

具有多样性, 不同虫黄藻对光照强度有着不同的需求, 造成了柳珊瑚颜色多样和生存环境的异质性^[39]。过强的光照会产生光抑制作用, 不仅影响虫黄藻的光合作用, 还使柳珊瑚有选择地排除部分虫黄藻^[40]。本研究发现, 实验组东海小月柳珊瑚和东海软柳珊瑚在超过这 4 种光源的适宜光照值时, 触手均紧缩, 紧闭于共肉组织中。Dubinsky 等^[41]研究证实, 当柳珊瑚遭受高强度光照时, 体内的虫黄藻密度和叶绿素 *a* 浓度会出现明显的下降, 以降低光合效率, 保护光合器官^[37]。本研究也证实, 当超过适宜光照范围, 实验组东海小月柳珊瑚颜色变暗, 东海软柳珊瑚体表颜色变浅, 这两种柳珊瑚均会呈现“烧焦”状态, 这表明光照值并不是越高越好。

根据梁君等^[5]研究可知, 日落到月升之间的黑暗期触发了珊瑚产卵的条件, 使珊瑚虫活跃, 便于统筹协调精子和卵子排放, 在某一个季节或者满月当天珊瑚虫更活跃且释放卵孢子。本研究发现, 东海小月柳珊瑚和东海软柳珊瑚在温度、盐度和光照下的开放等级均有所不同, 两种柳珊瑚的珊瑚虫触手开放主要集中在晚上 19:00, 柳珊瑚触手开放等级在夜间更活跃。

4 结论

综上, 实验室条件下, 当时间为 19:00、温度为 26.6 °C、盐度为 20.4 和蓝白光光照值为 45 410 lx 时, 是实验组东海小月柳珊瑚的最佳生存条件。时间为 19:00、温度为 26.8 °C、盐度为 30.4 时和白光光照值为 16 580 lx 时, 是实验组东海软柳珊瑚的最佳生存条件。本研究对柳珊瑚进行的是室内短期移植实验, 掌握它的适宜环境, 便于在海底移植时, 达到更好的条件。未来研究中, 可考虑将断枝移植柳珊瑚与其他环境因子或模型联系起来, 例如与多个环境因子之间的响应、未来气候变化情景评估、柳珊瑚生境适应性评价、柳珊瑚优势种评估等相结合, 以期能够预测未来人类活动压力导致的珊瑚生态系统变化, 为柳珊瑚长期保育计划的政策的制定和实施提供科学依据。

参考文献 (References):

- [1] 黄晖, 何建国, 李秀保, 等. 柳珊瑚分子系统发育学的研究进

- 展[J]. *海洋通报*, 2005, 24(2): 63-71,78.
- Huang H, He J G, Li X B, *et al.* Molecular phylogeny of gorgonian[J]. *Marine Science Bulletin*, 2005, 24(2): 63-71,78 (in Chinese).
- [2] 贾春斌, 王佳美, 唐振朝. 深圳东部海域珊瑚群落分布特征[J]. *渔业研究*, 2020, 42(6): 590-597.
- Jia C B, Wang J M, Tang Z Z. Distribution of coral communities in eastern sea area of Shenzhen[J]. *Journal of Fisheries Research*, 2020, 42(6): 590-597 (in Chinese).
- [3] 吴常文, 董智勇, 迟长凤, 等. 曼氏无针乌贼 (*Sepiella maindroni*) 繁殖习性及其产卵场修复的研究[J]. *海洋与湖沼*, 2010, 41(1): 39-46.
- Wu C W, Dong Z Y, Chi C F, *et al.* Reproductive and spawning habits of *Sepiella maindroni* off Zhejiang, China[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2010, 41(1): 39-46 (in Chinese).
- [4] Fujita T, Hirayama I, Matsuoka T, *et al.* Spawning behavior and selection of spawning substrate by cuttlefish *Sepia esculenta*[J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1997, 63(2): 145-151.
- [5] 梁君, 赵瑞, 隋有珍, 等. 八放珊瑚生物生态学现状, 退化原因及对策建议[J]. *应用海洋学学报*, 2023, 42(4): 726-738.
- Liang J, Zhao R, Sui Y Z, *et al.* Bioecological status, degradation causes and conservation suggestions of octocorals[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2023, 42(4): 726-738 (in Chinese).
- [6] Dela Cruz D W, Rinkevich B, Gomez E D, *et al.* Assessing an abridged nursery phase for slow growing corals used in coral restoration[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 84: 408-415.
- [7] Okubo N, Onuma A. An economic and ecological consideration of commercial coral transplantation to restore the marine ecosystem in Okinawa, Japan[J]. *Ecosystem Services*, 2015, 11: 39-44.
- [8] 李元超, 兰建新, 郑新庆, 等. 西沙赵述岛海域珊瑚礁生态修复效果的初步评估[J]. *应用海洋学学报*, 2014, 33(3): 348-353.
- Li Y C, Lan J X, Zheng X Q, *et al.* Preliminary assessment of the coral reef restoration in areas of Zhaoshu Island, Xiasha Islands[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2014, 33(3): 348-353 (in Chinese).
- [9] Edwards A J, Clark S. Coral transplantation: a useful management tool or misguided meddling?[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1999, 37(8-12): 474-487.
- [10] Soong K, Chen T A. Coral transplantation: regeneration and growth of *Acropora* fragments in a nursery[J]. *Restoration Ecology*, 2003, 11(1): 62-71.
- [11] 王欣, 高霆炜, 陈晓, 等. 涠洲岛园艺式珊瑚苗圃的架设与移植[J]. *广西科学*, 2017, 24(5): 462-467.
- Wang X, Gao T W, Chen X, *et al.* The construction and transplantation of coral gardening nursery in Weizhou island[J]. *Guangxi Sciences*, 2017, 24(5): 462-467 (in Chinese).
- [12] 王永刚, 黄雯, 吴志强, 等. 三种造礁石珊瑚断枝幼苗的生长及其与共生藻的关系研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2022, 44(1): 91-98.
- Wang Y G, Huang W, Wu Z Q, *et al.* Relationship between the growth of three scleractinian coral fragments and their symbiotic algae[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2022, 44(1): 91-98 (in Chinese).
- [13] 张岗. 中国南海侧扁软柳珊瑚化学成分及生物活性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- Zhang G. Studies on the chemical constituents and bioactivities of the South China Sea Gorgonian *Subergorgia suberosa*[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013 (in Chinese).
- [14] 吴荣翠. 花刺柳珊瑚 *Echinogorgia flora* 化学成分及生物活性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- Wu R C. Studies on chemical constituents and bioactivities of the gorgonian *Echinogorgia flora*[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013 (in Chinese).
- [15] 宁勤建. 中国南海侧扁软柳珊瑚和小月柳珊瑚次级代谢产物及其化学分类学意义[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- Ning Q J. Secondary metabolites and their chemotaxonomic significance of the Gorgonians *Subergorgia suberosa* and *Menella kanisa* from the South China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013 (in Chinese).
- [16] 李秀保, 黄晖, 练健生, 等. 福建东山海域柳珊瑚种类空间分布与多样性[J]. *台湾海峡*, 2011, 30(1): 92-96.
- Li X B, Huang H, Lian J S, *et al.* Diversity and spatial distribution of gorgonian coral In Dongshan coastal waters in Fujian, China[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2011, 30(1): 92-96 (in Chinese).
- [17] 徐雨, 李阳, 徐奎栋. 西太平洋马里亚纳海沟附近海山的金相柳珊瑚属(珊瑚虫纲: 软珊瑚目: 金柳珊瑚科) 二新记录种[J]. *海洋科学*, 2019, 43(6): 1-5.
- Xu Y, Li Y, Xu K D. First records of two species of *Metallogorgia* (Anthozoa: Alcyonacea: Chrysogorgiidae) from a seamount near the Mariana Trench in the Western Pacific Ocean[J]. *Marine Sciences*, 2019, 43(6): 1-5 (in Chinese).
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准

- 化管理委员会. 海洋调查规范 第 6 部分: 海洋生物调查: GB/T 12763.6-2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration of China. Specifications for oceanographic survey —Part 6: Marine biological surveys: GB/T 12763.6-2007 [S]. Beijing: China Standard Press, 2008 (in Chinese).
- [19] 牟奕林, 刘亚军. 尖锐轴孔珊瑚的人工养殖 [J]. 中国水产, 2009(3): 27-30.
- Mu Y L, Liu Y J. Artificial culture of *Acropora aculeus*[J]. China Fisheries, 2009(3): 27-30 (in Chinese).
- [20] 段晓伟, 肖宝华, 廖宝林, 等. 造礁石珊瑚自然海区断枝培育技术研究 [J]. 广东海洋大学学报, 2019, 39(3): 115-120.
- Duan X W, Xiao B H, Liao B L, *et al.* Fragments breeding research of hermatypic corals in natural sea area[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2019, 39(3): 115-120 (in Chinese).
- [21] 刘旭, 黄雯, 俞小鹏, 等. 适度热胁迫对造礁石珊瑚热耐受性影响的研究 [J]. 海洋湖沼通报, 2022, 44(1): 99-105.
- Liu X, Huang W, Yu X P, *et al.* Studies on the effect of moderate heat stress on the heat tolerance of scleractinian coral[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2022, 44(1): 99-105 (in Chinese).
- [22] 刘志刚, 王辉, 栗志民, 等. 墨西哥湾扇贝高起始致死温度的研究 [J]. 中国水产科学, 2007, 14(5): 778-785.
- Liu Z G, Wang H, Li Z M, *et al.* Upper incipient lethal temperature of *Argopecten irradians concentricus* Say[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2007, 14(5): 778-785 (in Chinese).
- [23] Duncan J M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, 126(4): 307-316.
- [24] Guisan A, Edwards Jr T C, Hastie T. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene[J]. *Ecological Modelling*, 2002, 157(2-3): 89-100.
- [25] 徐国强, 朱文斌, 张洪亮, 等. 基于 GAM 模型分析印度洋大眼金枪鱼和黄鳍金枪鱼渔场分布与不同环境因子关系 [J]. 海洋学报, 2018, 40(12): 68-80.
- Xu G Q, Zhu W B, Zhang H L, *et al.* Relationship between fishing grounds of *Thunnus obesus* and *Thunnus albacores* with environmental factors in the Indian Ocean based on generalized additive model[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 40(12): 68-80 (in Chinese).
- [26] 胡益峰, 蒋红. 中街山列岛国家级海洋特别保护区海域表层沉积物重金属污染状况及变化趋势分析 [J]. 海洋开发与管理, 2012, 29(11): 67-70.
- Hu Y F, Jiang H. Analysis of heavy metal pollution and change trend in surface sediments of Zhongjieshan Islands National Marine Special Reserve[J]. *Ocean Development and Management*, 2012, 29(11): 67-70 (in Chinese).
- [27] 李淑, 余克服. 珊瑚礁白化研究进展 [J]. 生态学报, 2007, 27(5): 2059-2069.
- Li S, Yu K F. Recent development in coral reef bleaching research[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 2059-2069 (in Chinese).
- [28] Moya A, Sakamaki K, Mason B M, *et al.* Functional conservation of the apoptotic machinery from coral to man: the diverse and complex Bcl-2 and caspase repertoires of *Acropora millepora*[J]. *BMC Genomics*, 2016, 17(1): 62.
- [29] 刘方园, 黄远, 黎焯, 等. 愈合期不同温度和光照处理对甜瓜嫁接苗质量的影响 [J]. 中国瓜菜, 2019, 32(3): 18-21.
- Liu F Y, Huang Y, Li X, *et al.* Effects of different temperature and light treatments during grafting healing period on the quality of grafted melon seedlings[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2019, 32(3): 18-21 (in Chinese).
- [30] 王雪萍, 高士伟, 郑鹏程, 等. 温度和光周期对茶树扦插繁育的影响 [J]. 湖北农业科学, 2019, 58(22): 120-122.
- Wang X P, Gao S W, Zheng P C, *et al.* Effects of temperature and photoperiod on cutting propagation of tea plants[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2019, 58(22): 120-122 (in Chinese).
- [31] 李泽鹏. 主要环境因子对滨珊瑚的胁迫作用研究 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2012.
- Li Z P. Stress of the main environmental factors on *Poritidae*[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2012 (in Chinese).
- [32] 陈燕, 李成才, 晁飞飞, 等. 环境因子对造礁石珊瑚白化影响的研究进展及思考 [J]. 黑龙江科技信息, 2016(2): 129-130.
- Chen Y, Li C C, Chao F F, *et al.* Progress and thoughts on the effects of environmental factors on reef-building coral bleaching[J]. *Heilongjiang Science and Technology Information*, 2016(2): 129-130 (in Chinese).
- [33] Hoegh-Guldberg O, Smith G J. The effect of sudden changes in temperature, light and salinity on the population density and export of zooxanthellae from the reef corals *Stylophora pistillata* Esper and *Seriatopora hystrix* Dana[J]. *Journal of Experi-*

- mental *Marine Biology and Ecology*, 1989, 129(3): 279-303.
- [34] Hoegh-Guldberg O. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs[J]. *Marine and Freshwater Research*, 1999, 50(8): 839-866.
- [35] Liang J, Wang W D, Xu H X, *et al.* Diel and seasonal variation in fish communities in the Zhongjieshan marine island reef reserve[J]. *Fisheries Research*, 2020, 227: 105549.
- [36] 马鸿梅, 王云祥, 秦传新, 等. 风信子鹿角珊瑚对环境因子的响应研究 [J]. *海洋渔业*, 2019, 41(5): 536-545.
Ma H M, Wang Y X, Qin C X, *et al.* An experimental study on behavior responses of *Acropora hyacinthus* to environmental factors variations[J]. *Marine Fisheries*, 2019, 41(5): 536-545 (in Chinese).
- [37] Wijgerde T, Henkemans P, Osinga R. Effects of irradiance and light spectrum on growth of the scleractinian coral *Galaxea fascicularis*—applicability of LEP and LED lighting to coral aquaculture[J]. *Aquaculture*, 2012, 344-349: 188-193.
- [38] Schlacher T A, Stark J, Fischer A B P. Evaluation of artificial light regimes and substrate types for aquaria propagation of the staghorn coral *Acropora solitaryensis*[J]. *Aquaculture*, 2007, 269(1-4): 278-289.
- [39] Warner M E, Lesser M P, Ralph P J. Chlorophyll fluorescence in reef building corals[M]//Suggett D J, Prášil O, Borowitzka M A. Chlorophyll *a* fluorescence in aquatic sciences: methods and applications. Dordrecht: Springer, 2010: 209-222.
- [40] 李秀保, 黄晖, 练健生, 等. 珊瑚及共生藻在白化过程中的适应机制研究进展 [J]. *生态学报*, 2007, 27(3): 1217-1225.
Li X B, Huang H, Lian J S, *et al.* Progress of adaptive mechanism of coral and symbiotic algae during bleaching[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 1217-1225 (in Chinese).
- [41] Dubinsky Z, Stambler N. Coral reefs: an ecosystem in transition (Google eBook) [M/OL]. Dordrecht: Springer Science Business Media, 2010: 562 [2022-11-04]. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-007-0114-4>.

Adaptability of gorgonians to temperature, salinity and light after branch-cut transplantation

ZHAO Rui¹, LIANG Jun^{1,2,3*}, SUI Youzhen^{1,2,3}, HU Yangjie¹, WU Tian¹,
DING Weikang¹, LI Xueting¹

1. Zhejiang Marine Fisheries Research Institute,

Marine and Fisheries Institute of Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316021, China;

2. Scientific Observing and Experimental Station of Fishery Resources for Key Fishing Grounds,

Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316021, China;

3. Key Laboratory of Sustainable Utilization of Technology Research for Fishery Resource of Zhejiang Province,
Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316021, China

Abstract: Gorgonians serve as crucial natural spawning substrates for *Sepiella japonica*. Given the decline in gorgonian resources, restoring their populations and reconstructing the key habitats for squids is of urgent importance. In July 2021, 80 strains of white and red gorgonian corals were collected from the Zhongjieshan Archipelago Marine Special Reserve. This study analyzed the survival rates and openness levels of *Menella* sp. and *Suberogorgia* sp. under four different time periods (7:00, 11:00, 15:00, 19:00), five different temperature gradients (10, 15, 20, 25, 30 °C), six different salinity gradients (10, 15, 20, 25, 30, 35), and four light types (blue light, blue and white light, white light, indoor natural light) using the two-point and Duncan methods. The adaptability of transplanted gorgonians to three key environmental factors was explored. Results indicated that both *Menella* sp. and *Suberogorgia* sp. were most active at 19:00. The optimum survival temperature and salinity for *Menella* sp. were 21.9-26.9 °C and 17.7-24.4, respectively, with survival rates of 90.8% and 85.1%. *Menella* sp. was sensitive to blue and white light, with 57.9% and 40.2% of individuals achieving grade III or higher openness under these light conditions. For *Suberogorgia* sp., the optimal survival salinity was 24.4-34.6, with a survival rate of 95.4%, and sensitivity to white light. The proportion of individuals achieving grade III or higher openness for salinity and light was 23.4% and 54.1%, respectively. Both gorgonian species demonstrated adaptability to different environmental factors following branch-cut transplantation. The survival rate and openness grade of *Menella* sp. were significantly higher than those *Suberogorgia* sp. These findings provide a theoretical basis for ecological restoration and resource conservation of gorgonian corals.

Key words: *Menella* sp.; *Suberogorgia* sp.; branch-cutting transplantation; temperature; salinity; light

Corresponding author: LIANG Jun. E-mail: jliang@zjou.edu.cn

Funding projects: National Key R & D Program of China (2020YFD0900804, 2019YFD0901205, 2019YFD0901204); National Natural Science Foundation of China (31702346); Key R & D Program of Zhejiang Province (2019C02056)