

文章编号: 1674-7054(2022)03-0203-09



三亚礁区普哥滨珊瑚对海水悬浮物的生理适应

蔡文启¹, 唐佳¹, 吴川良², 张开典¹, 周智¹

(1. 海南大学海洋学院, 海口 570228; 2. 三亚珊瑚礁生态研究所, 三亚 572000)

摘要: 为了了解海水悬浮物质量浓度的升高对造礁石珊瑚的生存影响, 于2020年5-9月期间, 调查了三亚3个礁区(崖州湾、凤凰岛和西岛)的海水悬浮物质量浓度, 测定了礁区中普哥滨珊瑚(*Porites pukoensis*)及其共生虫黄藻的生理指标, 并筛选了敏感生物标志物, 用以评价悬浮物对普哥滨珊瑚的影响程度。结果表明, 崖州湾礁区的海水悬浮物月均质量浓度为13.7~19.4 mg·L⁻¹, 其含量显著高于凤凰岛(1.9~8.8 mg·L⁻¹)和西岛(0.7~5.3 mg·L⁻¹)。相关性分析表明, 海水悬浮物浓度与共生虫黄藻的密度($R = 0.27, P < 0.05$)和一氧化氮合成酶活力($R = 0.27, P < 0.05$)均呈显著正相关, 而与共生虫黄藻的谷胱甘肽S-转移酶活力呈显著负相关。因此, 普哥滨珊瑚可能通过共生虫黄藻密度和NOS活力的诱导及其GST活力的抑制来适应悬浮物浓度较高的礁区环境。此外, 本研究构建的综合生物标志物响应(IBR)指数具有崖州湾>凤凰岛>西岛的特征, 与礁区悬浮物含量趋势相一致, 提示IBR指数能够为珊瑚礁生态风险评估提供理论基础。

关键词: 悬浮物; 普哥滨珊瑚; 共生虫黄藻; 环境适应

中图分类号: Q 178.53 **文献标志码:** A

引用格式: 蔡文启, 唐佳, 吴川良, 等. 三亚礁区普哥滨珊瑚对海水悬浮物的生理适应 [J]. 热带生物学报, 2022, 13(3): 203-211. DOI: 10.15886/j.cnki.rdsxb.2022.03.001

珊瑚礁生态系统拥有较高的初级生产力和生物多样性, 为人类提供了极具价值的生态服务功能, 比如丰富的渔业和旅游资源^[1-2]。作为珊瑚礁生态系统的主要框架生物, 造礁石珊瑚的生长得益于共生虫黄藻提供的光合作用产物, 其能满足珊瑚的大部分能量需求。作为交换, 造礁石珊瑚能为共生虫黄藻提供光合作用所需的二氧化碳(CO₂)、无机营养和稳定的环境。但是, 近年来表层海水升温和海洋环境污染威胁着造礁石珊瑚与虫黄藻的共生关系, 共生关系的破裂将进一步导致珊瑚白化或死亡, 珊瑚礁生态系统呈不断退化趋势^[3-5]。随着人类对海岸带的开发日益加剧, 海水悬浮物(Suspended solid)已经成为近岸珊瑚礁生态系统的主要胁迫因子之一。大量陆源颗粒物随地表径流输入珊瑚礁区, 造成海水悬浮物浓度显著升高, 同时水体浊度也明显增加。海水悬

浮物会产生遮蔽效应, 降低共生虫黄藻的光合效率^[6-7]。悬浮物还会缓慢释放出氮、磷等营养物质, 促进水体中其他藻类的爆发生长, 进一步加剧该遮蔽效应。海水悬浮物浓度的升高能对造礁石珊瑚的生存产生诸多消极影响, 从而不利于珊瑚礁生态系统的稳定性, 但相关了解仍然十分有限。

本研究于2020年5-9月期间调查了3个礁区(崖州湾、凤凰岛和西岛)的海水悬浮物质量浓度, 并测定了礁区中普哥滨珊瑚(*Porites pukoensis*)的共生虫黄藻密度、叶绿素a+c₂含量, 以及共生双方的超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)、谷胱甘肽S-转移酶(Glutathione S-transferase, GST)、一氧化氮合酶(Nitric oxide synthase, NOS)和酚氧化物酶(Phenoloxidase, PO)的活力, 进而分析礁区悬浮物质量浓度差异对普哥滨珊瑚生理活性的影

收稿日期: 2022-01-05

修回日期: 2022-02-26

基金项目: 海南省自然科学基金项目(2019RC067, 420CXTD432); 国家自然科学基金(31772460, 42076145)

第一作者: 蔡文启(1997-), 男, 海南大学2019级硕士研究生. E-mail: 904750145@qq.com

通信作者: 周智(1983-), 男, 博士, 研究员. 研究方向: 海洋生物学. E-mail: zhouzhi@hainanu.edu.cn

响,以期揭示造礁石珊瑚对高浓度悬浮物的的生理适应机制。此外,本研究还挑选了敏感生物标志物构建综合评价指标,旨在用以评估悬浮物对普哥滨珊瑚的影响程度。

1 材料与方法

1.1 礁区取样 于2020年5-9月期间,每月在三亚崖州湾(18°19'13"N, 109°8'47"E)、凤凰岛

(18°14'27"N, 109°29'05"E)和西岛(18°14'28"N, 109°21'54"E)3个礁区进行取样。每次每个站点用采水器取5份1.5L表层海水,同时潜水员下潜至水下3m左右,用锤子和凿子凿取5块不同亲本的普哥滨珊瑚样品。海水装在卡盖式采样瓶内低温避光保存,珊瑚立即置于铝箔袋并在干冰中保存。海水和珊瑚样品均于当日运回实验室开展后续实验。取样位置见图1。

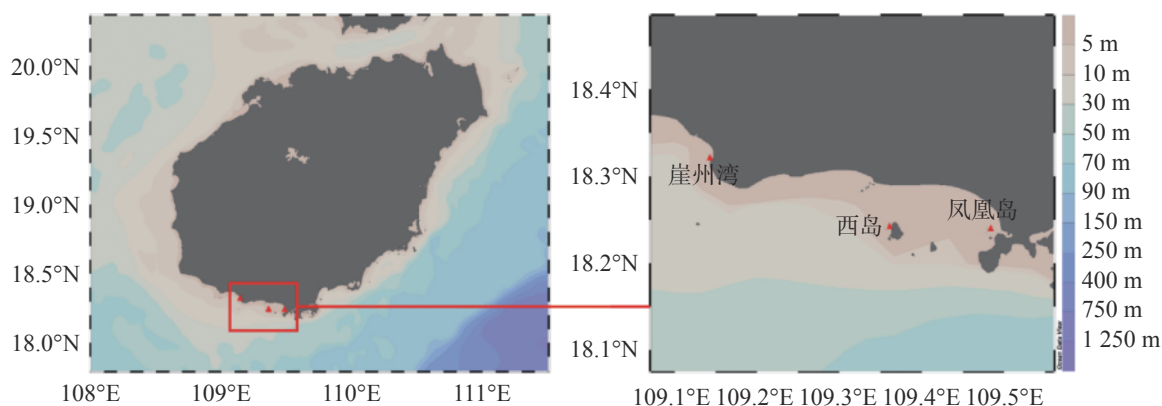


图1 取样站点

崖州湾 18°19'13"N, 109°8'47"E; 凤凰岛 18°14'27"N, 109°29'05"E; 西岛 18°14'28"N, 109°21'54"E。

1.2 实验试剂 磷酸盐缓冲溶液(PBS, 377 mmol·L⁻¹ NaCl, 2.7 mmol·L⁻¹ KCl, 8.09 mmol·L⁻¹ Na₂HPO₄, 1.47 mmol·L⁻¹ KH₂PO₄, pH7.4), 100% 丙酮, 4% 甲醛, 10 mmol·L⁻¹ 左旋多巴(L-DOPA) 溶液, 总 SOD 测定试剂盒(A001-1-1, 南京建成生物工程研究所有限公司), CAT 测定试剂盒(A007-1-1, 南京建成生物工程研究所有限公司), GST 测定试剂盒(A004-1-1, 南京建成生物工程研究所有限公司), 总 NOS 测定试剂盒(A014-2-2, 南京建成生物工程研究所有限公司), BCA 蛋白质定量检测试剂盒(C503021-0500, 上海生工生物工程股份有限公司)。

1.3 海水悬浮物浓度的测定 海水中的悬浮物浓度的测定严格按照《海洋监测规范》(GB 17378.4—2007)^[8] 第4部分进行。先将0.45 μm 孔径的滤膜(TJMF60, 天津市津腾实验设备有限公司)放置于50℃恒温干燥箱中6~8h烘干至恒重,然后用电子分析天平(BSA224S-CW, 赛多利斯科学仪器有限公司)称重,并放入硅胶干燥器中保存。过滤时,用不锈钢镊子将烘干滤膜取出,放置在搭配有隔膜真空泵(GM-0.5A, 天津市滕津实验设备有限公司)的滤器内。过滤1L表层海水后,将滤膜置

于50℃恒温干燥箱中充分干燥,再用电子分析天平称量滤膜质量。海水悬浮物质量浓度计算公式:

$$\text{海水悬浮物质量浓度} = \frac{\text{水样滤膜重量的增加值}}{\text{过滤海水的体积}}$$

1.4 共生虫黄藻的密度测定 使用装有过滤海水(经0.22 μm 孔径的滤膜过滤)的Waterpik 洗牙器(WP-462EC, 洁碧有限公司)冲洗普哥滨珊瑚的表面组织。取1mL冲洗液,7204 r·min⁻¹ 4℃离心10min,将共生虫黄藻沉淀重悬于0.2mL 4% 甲醛溶液中,在光学生物显微镜(E100, 尼康仪器有限公司)下使用Sedgwick-Rafter 计数板进行计数^[9]。采用铝箔纸包裹法^[10] 计算被冲洗的珊瑚骨骼表面积。共生虫黄藻密度计算公式:

$$\text{共生虫黄藻的密度} = \frac{\text{共生虫黄藻总数}}{\text{珊瑚骨骼表面积}}$$

1.5 共生虫黄藻的叶绿素含量测定 取上述2mL冲洗液,7204 r·min⁻¹ 4℃离心10min,然后用PBS清洗共生虫黄藻沉淀,重复离心清洗直至镜检无珊瑚组织碎屑。向共生虫黄藻沉淀中加入2mL 100% 丙酮溶液,4℃下萃取24h。最后,11617 r·min⁻¹ 离心15min,采用可见分光光度计(UV-1100, 上海美谱达仪器有限公司)分别在630nm和663

nm 处测量萃取液的吸光值^[11]。叶绿素 a+c₂ 的总含量参照 JEFFREY 等^[12] 的方程计算, 每个共生虫黄藻的叶绿素含量表示为 pg·cell⁻¹^[13]。

1.6 普哥滨珊瑚及其共生虫黄藻的酶活指标测定 用装有预冷 PBS(4 ℃) 的洗牙器冲洗普哥滨珊瑚的表面组织, 取 6 mL 冲洗液于 7 204 r·min⁻¹ 4 ℃ 离心 10 min, 取上清液用于珊瑚酶活的检测。然后用 2 mL PBS 重悬共生虫黄藻沉淀, 重复离心清洗直至镜检无珊瑚组织碎屑。加入 0.5 g 氧化锆破碎珠(0.5 mm 粒径, 11079105z, 上海睿铂赛生物科技有限公司)和 1 mL 预冷 PBS, 用生物样品均质仪(Bioprep-24, 杭州奥盛仪器有限公司)彻底破碎共生虫黄藻细胞, 参数为振幅 6 m·s⁻¹, 每破碎 1 min 冰浴 3 min。最后, 7 204 r·min⁻¹ 4 ℃ 离心 10 min, 取上清液用于共生虫黄藻酶活的检测。使用 SOD、CAT、NOS 和 GST 检测试剂盒测定上述上清液中的总酶活力。珊瑚的 PO 总活性测定参考 PALMER^[14] 描述的方法, 将珊瑚上清液与 L-DOPA 溶液反应后于 490 nm 处测定吸光值用以表示其总酶活力。最后, 采用 BCA 蛋白定量检测试剂盒测定上清液中的总蛋白浓度。将普哥滨珊瑚及其共生虫黄藻的总酶活力除以蛋白浓度, 计算出相应的酶比活力(U·mg⁻¹ 或 ΔOD₄₉₀ mg⁻¹·min⁻¹)。

1.7 数据处理 所有数据以平均值 ± 标准差表示。采用双因素方差分析不同站点的海水悬浮物浓度差异。采用 PCA 分析普哥滨珊瑚及其共生虫黄藻的各项生理活性指标主效应, 采用 Spearman 秩方法分析海水悬浮物浓度与各生理指标之间的相关性。综合生物标志物响应(Integrated Biomarker Response)指数分析参照文献 [15] 的方法。统计分析的显著差异定义为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 3 个礁区的海水悬浮物质量浓度

2020 年 5—9 月, 崖州湾礁区的海水悬浮物月平均质量浓度为 13.7~19.4 mg·L⁻¹, 总平均质量浓度为 16.3 mg·L⁻¹; 凤凰岛礁区的海水悬浮物月平均质量浓度为 1.9~8.8 mg·L⁻¹, 总平均质量浓度为 5.3 mg·L⁻¹; 西岛礁区的海水悬浮物质量浓度最低, 月平均质量浓度为 0.7~5.3 mg·L⁻¹, 总平均质量浓度为 2.6 mg·L⁻¹。双因素方差分析结果显示, 崖州湾的海水悬浮物质量浓度显著高于凤凰岛和西岛($P < 0.05$) (图 2)。

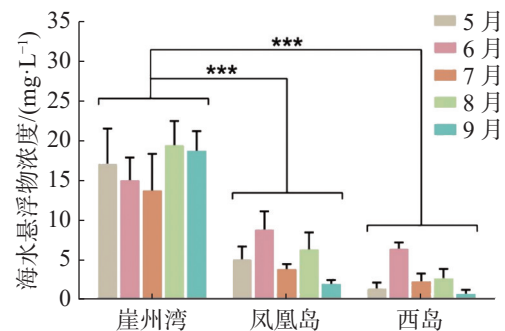


图 2 3 个礁区的海水悬浮物浓度

2.2 普哥滨珊瑚和共生虫黄藻的生理活性指标 从表 1 可见, 普哥滨珊瑚 SOD、CAT、NOS、GST 和 PO 活力的平均值分别为 111.60、119.83、9.46、253.99 U·mg⁻¹ 和 0.087 ΔOD₄₉₀ mg⁻¹·min⁻¹, SOD、NOS 和 PO 活力的最高月平均值均来自 6 月份崖州湾, 而 CAT 和 GST 活力的最高月平均值分别来自 8 月份西岛和 5 月份崖州湾。共生虫黄藻的平均密度为 2.97×10⁶ cells·cm⁻², 叶绿素 a+c₂ 的平均含量为 5.87 pg·cell⁻¹, 两者的最高月平均值都在 7 月份崖州湾。此外, 共生虫黄藻 SOD、CAT、NOS 和 GST 活力的平均值分别为 205.69、141.89、20.50 和 939.58 U·mg⁻¹, SOD 与 NOS 活力的最高月平均值均见于 6 月份凤凰岛, 而 CAT 和 GST 活力的最高月平均值分别见于 8 月份凤凰岛和 5 月份西岛。

表 1 3 个礁区普哥滨珊瑚和共生虫黄藻生理指标结果

生理指标	月份	站点		
		崖州湾	凤凰岛	西岛
共生虫黄藻密度/(10 ⁶ cells·cm ⁻²)	5月	1.786±0.763	2.428±1.086	1.864±0.502
	6月	3.689±1.512	4.821±0.608	2.674±0.341
	7月	3.240±1.434	3.186±0.859	3.669±0.810
	8月	3.805±1.144	4.175±1.189	2.888±0.756
	9月	2.621±0.559	1.759±0.561	1.953±0.310

续表 1

生理指标	月份	站点		
		崖州湾	凤凰岛	西岛
叶绿素a+c ₂ 含量/(pg·cell ⁻¹)	5月	4.269±1.810	2.351±1.516	5.134±0.767
	6月	7.727±1.612	8.629±1.051	7.453±2.435
	7月	4.845±3.01	5.974±1.797	6.869±1.755
	8月	3.889±1.343	3.274±0.732	5.403±0.951
	9月	8.25±1.875	6.649±2.091	7.319±2.174
珊瑚SOD活力/(U·mg ⁻¹)	5月	96.557±18.723	91.042±24.651	111.76±52.316
	6月	174.365±75.431	149.883±88.966	68.109±50.648
	7月	62.977±25.87	91.307±40.783	70.2±28.036
	8月	122.752±35.68	92.791±37.929	130.209±95.128
	9月	142.572±33.835	175.89±95.847	93.649±37.845
珊瑚CAT活力/(U·mg ⁻¹)	5月	42.548±15.742	40.784±21.284	67.636±50.313
	6月	185.755±72.074	109.32±41.769	84.729±23.426
	7月	148.234±44.363	213.818±23.847	137.154±45.086
	8月	52.892±26.047	134.084±25.884	224.758±66.305
	9月	135.837±11.744	150.012±60.795	69.901±22.223
珊瑚NOS活力/(U·mg ⁻¹)	5月	14.395±6.721	18.818±4.303	23.125±10.762
	6月	33.877±25.169	9.495±4.450	10.888±7.496
	7月	5.776±1.611	6.408±2.278	5.381±2.071
	8月	2.308±2.261	1.359±0.917	1.782±1.742
	9月	1.822±0.832	3.457±2.505	3.049±0.949
珊瑚GST活力/(U·mg ⁻¹)	5月	695.678±296.248	264.556±121.349	372.585±214.535
	6月	186.977±85.356	319.531±365.753	494.294±499.845
	7月	130.213±85.169	261.35±120.612	201.435±39.626
	8月	90.904±59.698	137.689±60.233	205.653±137.246
	9月	126.226±106.951	184.134±86.244	138.556±75.664
珊瑚PO活力/(ΔOD ₄₉₀ mg ⁻¹ ·min ⁻¹)	5月	0.0963±0.0467	0.0954±0.021	0.1279±0.0438
	6月	0.1815±0.0418	0.1256±0.06	0.1105±0.0365
	7月	0.1112±0.0384	0.1031±0.0174	0.1099±0.0357
	8月	0.0445±0.0148	0.0389±0.0105	0.0499±0.0183
	9月	0.0274±0.006	0.0465±0.0093	0.0339±0.0108
虫黄藻SOD活力/(U·mg ⁻¹)	5月	150.226±59.635	304.454±206.143	181.206±144.336
	6月	112.355±66.322	388.6±146.152	239.389±138.104
	7月	291.84±57.683	237.028±61.139	193.867±27.792
	8月	56.681±33.557	86.351±52.701	131.422±88.059
	9月	215.992±91.034	372.934±175.208	122.963±88.74
虫黄藻CAT活力/(U·mg ⁻¹)	5月	68.129±68.685	90.707±83.761	64.624±39.025
	6月	154.1±74.579	275.716±115.045	184.314±76.283
	7月	90.911±38.769	82.17±40.522	19.407±11.627
	8月	83.671±33.861	340.214±124.129	114.47±42.137
	9月	131.68±77.868	324.237±142.653	103.993±42.481
虫黄藻NOS活力/(U·mg ⁻¹)	5月	18.288±5.553	30.984±13.002	8.581±3.987
	6月	42.994±15.7	84.53±17.596	48.802±26.827
	7月	19.762±3.157	16.589±5.501	11.897±2.792

续表 1

生理指标	月份	站点		
		崖州湾	凤凰岛	西岛
虫黄藻GST活力/(U·mg ⁻¹)	8月	6.3±1.303	7.187±5.29	5.362±2.124
	9月	1.059±1.248	3.215±1.137	2.01±0.725
	5月	719.759±403.716	1821.457±2090.806	2368.352±2154.323
	6月	505.725±6.894	1058.016±262.674	948.036±477.025
	7月	485.931±256.245	332.666±205.209	143.135±37.214
	8月	285.938±224.64	230.056±130.254	284.081±142.298
	9月	1222.728±548.522	2078.299±1085.766	1609.518±837.705

2.3 海水悬浮物浓度与生理活性指标的关联分析 采用主成分分析方法(PCA)探索普哥滨珊瑚及其共生虫黄藻的各项生理活性指标的主效应。如图 3 所示, PC1 占 20.2%, PC2 占 15.3%, 两者总和为 35.5%, 主效应不显著。同时, 对各礁区海水悬浮物质量浓度与普哥滨珊瑚及其共生虫黄藻的各项生理活性指标进行关联分析。结果发现, 海水悬浮物质量浓度与共生虫黄藻的密度和 NOS 活力均呈显著性正相关($R=0.27, P<0.05; R=0.27, P<0.05$), 而与共生虫黄藻的 GST 活力呈显著负

相关($R=-0.26, P<0.05$)(图 4)。

2.4 普哥滨珊瑚的 IBR 指数分析 选与海水悬浮物质量浓度相关性相对高($R \geq 0.1$ 或 $R \leq -0.1$)的生理活性指标(普哥滨珊瑚的 SOD 和 GST 活力, 以及共生虫黄藻的密度、SOD、NOS 和 GST 活力), 计算和分析 3 个礁区(崖州湾、凤凰岛和西岛)普哥滨珊瑚的综合生物标志物响应指数, 绘制了生物标志物星状图。崖州湾普哥滨珊瑚的综合生物标志物响应指数值最高, 为 0.060 5, 凤凰岛为 0.021 3, 西岛仅为 0.017 4(图 5)。

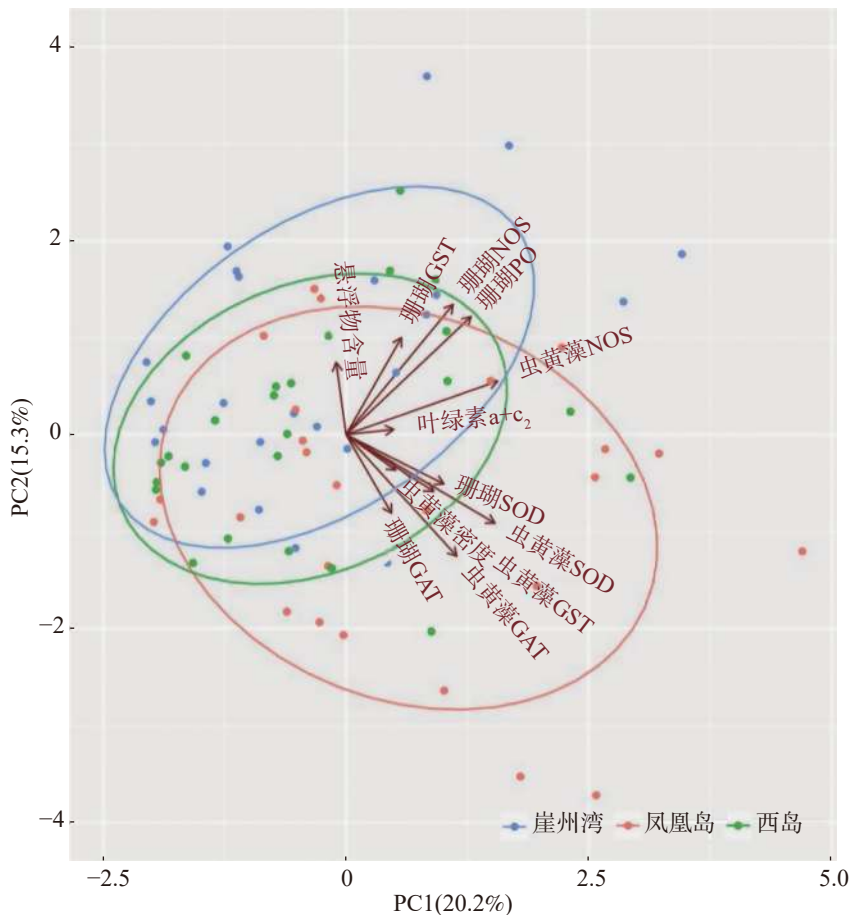


图 3 3 个礁区海水悬浮物浓度与普哥滨珊瑚及其共生虫黄藻生理活性指标间的主成分分析

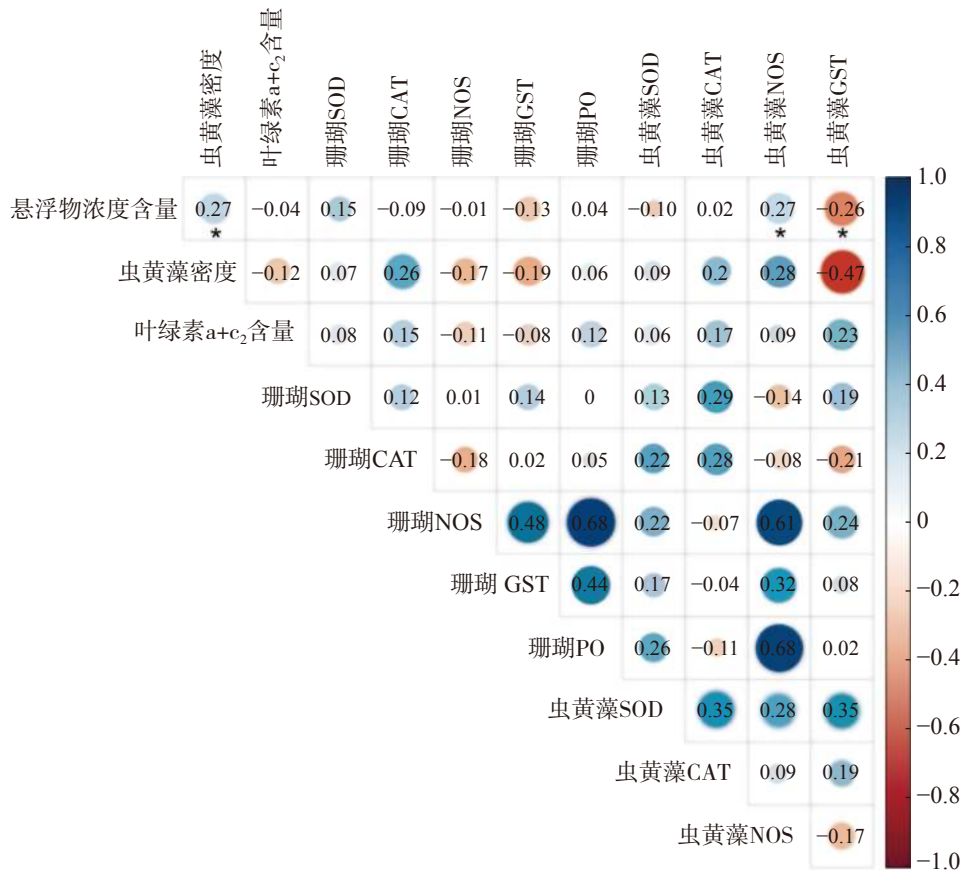


图4 3个礁区海水悬浮物浓度与普哥滨珊瑚及其共生虫黄藻生理活性指标之间的关联分析

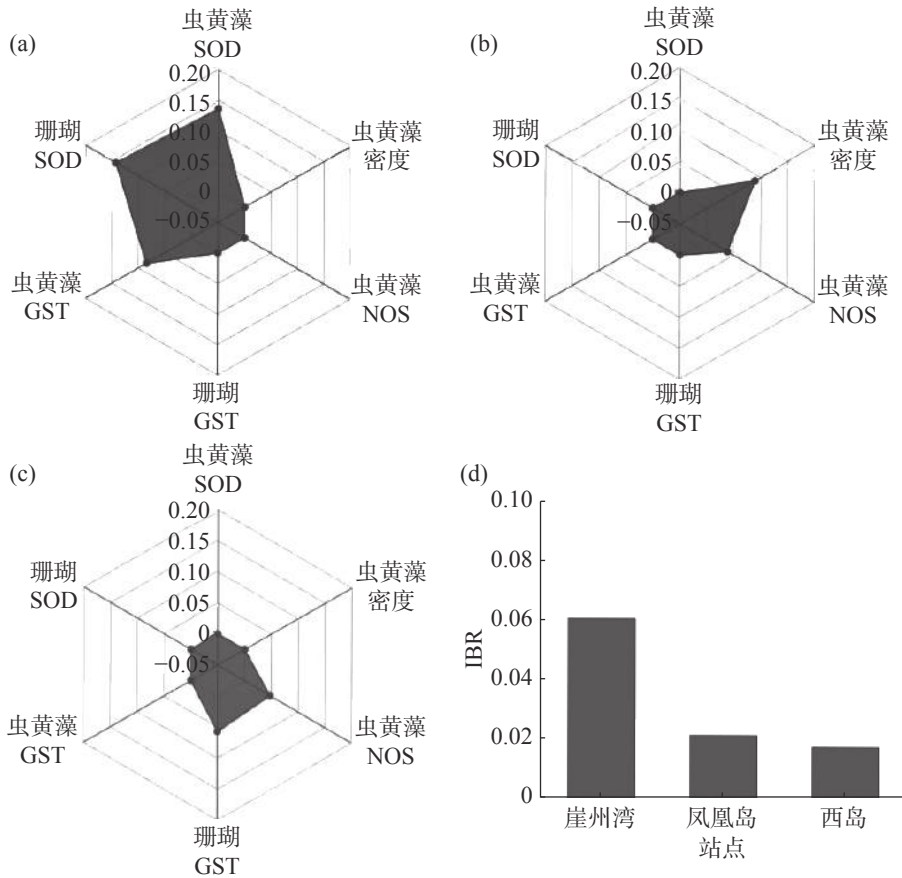


图5 3个礁区(a崖州湾、b凤凰岛和c西岛)的生物标志物星状图与指数柱状图(d)

3 讨论

近年来,随着人类对滨海的不断开发与利用,近海礁区水质明显下降,已严重威胁到珊瑚礁生态系统的健康和安全^[16-17]。有研究表明,海水悬浮物浓度的升高是近岸珊瑚礁不断退化的原因之一^[18-19],也有研究表明,在悬浮物浓度较高的海区一些珊瑚可以长时间生存^[20]。为了揭示自然礁区中海水悬浮物对造礁石珊瑚的生理影响,本研究在三亚选取海水悬浮物浓度存在显著差异的3个礁区(崖州湾、凤凰岛和西岛),调查了海水悬浮物浓度的月际变化规律,检测了在3个礁区均分布的普哥滨珊瑚的生理活性,以期阐明造礁石珊瑚对高浓度悬浮物环境的适应机制。

笔者在调查中发现,崖州湾礁区的海水悬浮物质量浓度长期高于 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,超过了一类海水的相关标准^[21]。崖州湾附近分布着大量水产养殖高位池,养殖过程中产生的残饵、排泄物、死亡生物和渔民生活污水等直接流入附近的珊瑚礁区;湾内南山港码头是三亚市的主要货运码头,来往大型货运船经常卷起底部沉积物,两者可能共同导致了崖州湾礁区海水悬浮物质量浓度的较高水平。凤凰岛毗邻临春河入海口,有城市污水的不断输入^[22],这可能导致了凤凰岛礁区海水悬浮物质量浓度略高于西岛。因此,海水悬浮物污染已成为或将成为三亚近岸珊瑚礁的威胁因素之一。

赵美霞等^[23]的调查结果表明,普哥滨珊瑚正逐渐成为三亚近岸珊瑚礁中的优势种,在海水悬浮物浓度较高的崖州湾礁区更是唯一幸存的珊瑚种。为了深入解析海水悬浮物对造礁石珊瑚的生理影响,本研究检测了3个礁区中普哥滨珊瑚的共生虫黄藻密度和叶绿素 $a+c_2$ 含量,以及珊瑚宿主和共生虫黄藻中环境胁迫相关酶(SOD、CAT、GST、NOS和PO)的活力。PCA分析发现,普哥滨珊瑚及其共生虫黄藻中多项生理活性指标的主效应并不显著。相关性分析表明,海水悬浮物质量浓度与共生虫黄藻的密度和NOS活力显著正相关,而与共生虫黄藻的GST活力显著负相关。与海水悬浮物质量浓度显著相关的指标均是共生虫黄藻的生理指标,表明普哥滨珊瑚通过调控共生虫黄藻的生理活性来适应高海水悬浮物浓度的礁区环境。三亚礁区海水悬浮物浓度($0.7 \sim 19.4$

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的升高诱导了普哥滨珊瑚共生虫黄藻密度的增加,这与JONES等^[24]的研究结果一致。这种诱导作用可归因于悬浮物对普哥滨珊瑚的遮荫效应,海水悬浮物质量浓度越高,共生虫黄藻获得的光照越不足,随之导致其光合作用产物减少。因此,普哥滨珊瑚能通过增加共生虫黄藻的密度来满足自身的能量需求,从而适应高海水悬浮物质量浓度环境。此外,海水悬浮物质量浓度的升高增加了共生虫黄藻的NOS活力,但抑制了其GST活力。因为共生虫黄藻的SOD和CAT活力与海水悬浮物质量浓度未呈显著相关性,NOS活力的上升可能并未导致胞内的过氧化水平,而是经由NO通路调节藻体的生理活性^[25]。GST活性的下降可能会抑制共生虫黄藻的解毒水平,这可能是普哥滨珊瑚宿主降低共生虫黄藻的解毒耗能,而增加其对自身的能量供应^[26]。因此,普哥滨珊瑚可能通过增加共生虫黄藻的密度和NOS活性,而降低其GST活力来适应高海水悬浮物质量浓度的崖州湾礁区环境。这种对不同海水悬浮物质量浓度的适应性调节与普哥滨珊瑚的综合生物标志物响应指数相一致,崖州湾的普哥滨珊瑚指数值>凤凰岛>西岛。综上所述,普哥滨珊瑚能生存于较高海水悬浮物质量浓度环境的机制在于对共生虫黄藻生理的调控,包括对其密度和NOS活力的诱导,以及对GST活力的抑制。

笔者比较了三亚3个礁区的海水悬浮物浓度,分析了海水悬浮物浓度与普哥滨珊瑚及其共生虫黄藻的各项生理指标间的关系,并构建了3个礁区普哥滨珊瑚的综合生物标志物响应指数,发现崖州湾礁区海水悬浮物浓度最高,普哥滨珊瑚可能通过诱导共生虫黄藻的密度和NOS活力以及抑制共生虫黄藻的GST活力,来适应崖州湾礁区的较高悬浮物环境。此外,本研究构建的综合评价指标能够评估悬浮物对普哥滨珊瑚的影响程度,以期对珊瑚礁生态风险评估提供理论基础。

参考文献:

- [1] 邹仁林. 造礁石珊瑚[J]. 生物学通报, 1998(6): 10-13.
- [2] COSTANZA R, GROOT R, SUTTON P, et al. Changes in the global value of ecosystem services [J]. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [3] 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.
- [4] SULLY S, DE BURKEPILE, DONOVAN M K, et al. A global analysis of coral bleaching over the past two decades [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1264.
- [5] 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 Experimental Marine Biology & Ecology*, 1989, 129(3): 279 – 303.
- [6] WILD C, MAYER, F W. Coral mucus release and following particle trapping contribute to rapid nutrient recycling in a Northern Red Sea fringing reef [J]. *Marine and Freshwater Research*, 2010, 61(9): 1006 – 1014.
- [7] BAINBRIDGE Z T, WOLANSKI E, ÁLVAREZ-ROMERO J G, et al. Fine sediment and nutrient dynamics related to particle size and floc formation in a Burdekin River flood plume, Australia [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 65(4-9): 236 – 248.
- [8] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 海洋监测规范 第4部分: 海水分析: GB 17378.4—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [9] XIN L, ZHANG H, HUANG B, et al. Alkaline phosphatase gene sequence characteristics and transcriptional regulation by phosphate limitation in *Karenia brevis* (Dinophyceae) [J]. *Harmful Algae*, 2012, 17: 14 – 24.
- [10] JOHANNES R E, KUENZEL C. The role of zooplankton in the nutrition of some scleractinian corals [J]. *Limnology & Oceanography*, 1970, 15(4): 579 – 586.
- [11] HEDOUIN L S, WOLF R E, PHILLIPS J, et al. Improving the ecological relevance of toxicity tests on scleractinian corals: Influence of season, life stage, and seawater temperature [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 213: 240 – 253.
- [12] JEFFREY S W, HUMPHREY G F, et al. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton [J]. *Biochimie Und Physiologie Der Pflanzen*, 1975, 167(2): 191 – 194.
- [13] TANG J, WU Z, WAN L, et al. Differential enrichment and physiological impacts of ingested microplastics in scleractinian corals *in situ* [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 404: 124205.
- [14] PALMER C V, BYTHELL J C, WILLIS B L. A comparative study of phenoloxidase activity in diseased and bleached colonies of the coral *Acropora millepora* [J]. *Developmental & Comparative Immunology*, 2011, 35(10): 1098 – 1101.
- [15] BELIAEFF B, BURGEOT T. Integrated biomarker response: A useful tool for ecological risk assessment [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2002, 21(6): 1316 – 1322.
- [16] ELAHI R, BIRKELAND C, SEBENS K P, et al. Limited change in the diversity and structure of subtidal communities over four decades [J]. *Marine Biology*, 2013, 160(12): 3209 – 3219.
- [17] DE'ATH G, FABRICIUS K E, et al. The 27-year decline of coral cover on the Great Barrier Reef and its causes. [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(44): 17995 – 17999.
- [18] CUNNING R, SILVERSTEIN R N, BARNES B B, et al. Extensive coral mortality and critical habitat loss following dredging and their association with remotely-sensed sediment plumes [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 145: 185 – 199.
- [19] JORDÁN-GARZA A G, GONZÁLEZ-GÁNDARA C, SALAS-PÉREZ J J, et al. Coral assemblages are structured along a turbidity gradient on the Southwestern Gulf of Mexico, Veracruz [J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 138: 32 – 40.
- [20] JOKIEL P L, RODGERS K S, STORLAZZI C D, et al. Response of reef corals on a fringing reef flat to elevated suspended-sediment concentrations: Moloka'i, Hawaii [J]. *Peer J.*, 2014(2): e699.
- [21] 国家环境保护局. 中华人民共和国国家标准——渔业水质标准: GB11607—89 [J]. *环境保护*, 1989(12): 25 – 27.
- [22] 张云飞. 海南人工岛对近岸环境影响遥感监测分析 [D]. 南昌: 江西理工大学, 2019.
- [23] 赵美霞, 余克服, 张乔民, 等. 近 50a 来三亚鹿回头石珊瑚物种多样性的演变特征及其环境意义 [J]. *海洋环境科学*, 2009, 28(2): 125 – 130.
- [24] JONES R, GIOFRE N, LUTER H M, et al. Responses of corals to chronic turbidity [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 1 – 13.
- [25] BOUCHARD J N, YAMASAKI H. Heat stress stimulates nitric oxide production in *Symbiodinium microadriaticum*: A possible linkage between nitric oxide and the coral bleaching phenomenon [J]. *Plant and Cell Physiology*, 2008, 49(4): 641 – 652.
- [26] COSTA A P L, SILVA D A M, RODRIGUES A C M, et al. Species-specific oxidative stress responses and cellular energy allocation after coral shipping [J]. *Aquaculture Reports*, 2021, 19: e100623.

Physiological acclimatization of the scleractinian coral *Porites pukoensis* to suspended solids in Sanya coral reefs

CAI Wenqi¹, TANG Jia¹, WU Chuanliang², ZHANG Kaidian¹, ZHOU Zhi¹

(1. Hainan University, Haikou 570228, China; 2. Sanya Coral Reef Ecology Institute, Sanya 572000, China)

Abstract: Elevated concentrations of suspended solids in seawater threaten the survival of scleractinian corals, but little is known about the mechanism of this phenomenon. During May-September 2020, a survey was made of the concentration of suspended solids in seawater in the coral reef areas of Yazhou Bay, Phoenix Island and West Island in Sanya, Hainan, China and the physiological indexes of the scleractinian coral *Porites pukoensis* and its Symbiodiniaceae symbionts were determined, from which sensitive biomarkers were screened to evaluate the effect of suspended solids on *P. pukoensis*. The results showed that the concentration of suspended solids in the seawater of Yazhou Bay reef area was $13.7 - 19.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, which was significantly higher than that in Phoenix Island ($1.9 - 8.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) and West Island ($0.7 - 5.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). The correlation analysis revealed significant positive correlations between suspended solids and the symbiotic density ($R = 0.27, P < 0.05$) or nitric oxide synthase activities ($R = 0.27, P < 0.05$), while the glutathione S-transferase activities in the symbionts were significantly negatively correlated with the concentration of the suspended solids. All these results suggest that *P. pukoensis* is adapted to the reef environment with a high concentration of suspended solids through the induction of symbiotic density and NOS activity and the inhibition of GST activity. Moreover, the integrated biomarker response (IBR) index established herein is in the descending order of Yazhou Bay > Phoenix Island > West Island, which is consistent with the order of the contents of the suspended solids in this coral reef area, indicating that the IBR index can be used for ecological risk assessment of coral reefs.

Keywords: suspended solid; *Porites pukoensis*; Symbiodiniaceae; acclimatization

(责任编辑:李秀保 责任编辑:潘学峰)